

Estudio técnico, económico y medioambiental de una embarcación para el transporte de personas en el Archipiélago de las Perlas

Trabajo de final de grado



Facultat de Nàutica de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya

Trabajo realizado por:
Carlos Díaz Bersabé

Dirigido por:
Marcel·la Castells
Manel Grifoll

Grado en Ingeniería en Sistemas y Tecnología Naval

Barcelona, octubre 2019

Departamento de Ciencia e Ingeniería Náuticas



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Facultat de Nàutica de Barcelona

Agradecimientos

Quisiera darle mis más sinceros agradecimientos a mi tutora Marcel·la Castells, por su profesionalidad, su constancia y su ayuda. Por saber guiarme y animarme en la realización del presente trabajo en momentos en los que yo dudaba.

A mis amigos y compañeros de la facultad Enric Torrents, Albert Pons y Matías Sabate a quienes, sin su ayuda, jamás hubiera logrado finalizar los estudios de grado en Ingeniería de Sistemas y Tecnología Naval.

A mi familia, a quienes quiero y me quieren, por confiar siempre en mi incluso cuando yo dejé de hacerlo.

A Patrice, propietario de la embarcación sujeto de estudio. Por facilitarme siempre la información requerida, necesaria para la realización del presente trabajo.

Este TFG se enmarca dentro del proyecto integrado en el Programa de Actividades de Cooperación de la UPC “Formación en navegación sostenible y evaluación de los usos energéticos y la sostenibilidad ambiental de la población de Isla Saboga (Panamá)”, proyecto desarrollado por la Universitat Politècnica de Catalunya y la Universidad Marítima Internacional de Panamá.

Muchas gracias.

Resumen

El presente trabajo nace de la necesidad de rediseñar una embarcación panameña situada en el golfo de Panamá, destinada al transporte de personas entre la costa de Panamá y el Archipiélago de las Perlas. Dicha embarcación se caracteriza por ser un proyecto local innovador, ya que su propulsión se basa en el uso de energías renovables como la eléctrica y la solar, mediante el uso de motores eléctricos y placas solares fotovoltaicas. A partir de esta nueva forma de navegar, la presente embarcación se aleja de una propulsión tradicional en la que se utilizan antiguos motores de dos tiempos de combustión interna, que emiten altos contenidos de CO₂ y resultan ser contaminante para el medio ambiente.

Ante la presente situación, el propietario de la embarcación ha facilitado la información técnica necesaria para que se estudie una nueva propuesta del sistema de propulsión eléctrico y solar, con el objetivo de proporcionar mejoras en cuanto al peso, la potencia y la autonomía de la embarcación.

Con la nueva propuesta, no solo se conseguirá una reducción de la contaminación de nuestros océanos y atmósfera, sino que se logrará una navegación limpia y silenciosa, lejos de la ruidosa propulsión de los motores de combustión interna.

Abstract

The main objective of this project was born as a result of the need to redesign a Panamanian vessel dedicated to the transportation of people between the islands of the Pearl Islands in Panama.

This boat is characterized by being a pioneer in the area, being propelled with electric engines and solar energy. With this type of propulsion, it is possible to considerably reduce the pollution that boats propelled with combustion engines implies, since it reduces the amount of fuel burned and, therefore, the emissions of polluting gases in the environment.

In view of this situation, the owner of the boat provided us with the necessary technical information to make a new proposal for the propulsion system. In this project, working side by side with my tutors, a series of detailed studies will be carried out such as: economic, autonomy, weight, power and design, the various electric elements that exist in the shipbuilding industry as well as the different types of solar propulsion. Once the conclusions are drawn, for which are the best components for an electric and solar propulsion for this type of boat, a report will be made with the new design.

With this proposal, not only is it possible to reduce the pollution of the oceans and the atmosphere, but also to achieve a clean and silent navigation, far away from the noisy propulsion of combustion engines.

Tabla de contenidos

| | |
|--|---------------|
| AGRADECIMIENTOS | II |
| RESUM | III |
| ABSTRACT | IV |
| TABLA DE CONTENIDOS | V |
| LISTADO DE FIGURAS | VIII |
| LISTADO DE TABLAS | X |
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 SOBRE EL PROYECTO | 1 |
| 1.2 MOTIVACIÓN | 2 |
| 1.3 SITUACIÓN ACTUAL | 2 |
| 1.4 EMBARCACIÓN ACTUAL | 4 |
| 1.4.1 DATOS TÉCNICOS DE LA EMBARCACIÓN | 5 |
| CAPÍTULO 2. ESTUDIO MEDIOAMBIENTAL | 9 |
| 2.1 INTRODUCCIÓN | 9 |
| 2.1.1 MARCO TEÓRICO | 9 |
| 2.1.1 GASES DE EFECTO INVERNADERO | 11 |
| 2.2 IMPACTO MEDIOAMBIENTAL DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA | 12 |
| 2.2.1 IMPACTO A NIVEL GLOBAL | 13 |
| 2.2.1 IMPACTO A NIVEL LOCAL | 16 |
| 2.3 IMPACTO MEDIOAMBIENTAL EN LA FABRICACIÓN DE BATERÍAS | 17 |
| 2.4 IMPACTO MEDIOAMBIENTAL EN LA FABRICACIÓN DE BATERÍAS | 21 |
| 2.5 CONCLUSIONES | 23 |
| CAPÍTULO 3. MOTORIZACIÓN | 25 |
| 3.1 INTRODUCCIÓN | 25 |
| 2.2.1 EL MOTOR ELÉCTRICO | 26 |
| 3.2 CONCEPTOS BÁSICOS | 27 |
| 3.3 PRINCIPIOS BÁSICOS DE FUNCIONAMIENTO | 29 |
| 3.3.1 CAMPO MAGNÉTICO | 29 |
| 3.4 FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR ELÉCTRICO | 33 |
| 3.5 TIPOS DE ARRANQUE DE UN MOTOR ALTERNO | 37 |
| 3.6 TIPOLOGÍA DE MOTORES ELÉCTRICOS | 40 |
| 3.7 COMPARATIVA | 43 |

| | |
|--------------------------------|-----------|
| 3.8 PROPUESTA DE MEJORA | 46 |
|--------------------------------|-----------|

| | |
|---------------------------------|-----------|
| CAPÍTULO 4. LAS BATERÍAS | 47 |
|---------------------------------|-----------|

| | |
|---|-----------|
| 4.1 INTRODUCCIÓN | 47 |
| 4.2 LAS BATERÍAS | 47 |
| 4.2.1 PRINCIPIOS BÁSICOS | 48 |
| 4.2.2 PARÁMETROS PRINCIPALES | 48 |
| 4.3 TIPOLOGÍA DE BATERÍAS | 50 |
| 4.3.1 BATERÍAS DE ION-LITIO | 51 |
| 4.3.2 BATERÍAS DE PLOMO-ÁCIDO | 54 |
| 4.3.3 BATERÍAS DE SODIO-SULFURO | 56 |
| 4.4 COMPARATIVA DE LAS BATERÍAS | 57 |
| 4.6 DISPOSICIÓN DE LAS BATERÍAS | 59 |
| 4.7 COMPARATIVA | 60 |
| 4.7.1 BATERÍA TORQEEDO POWER 48-5000 | 61 |
| 4.7.2 BATERÍA VICTRON ENERGY ION-LITHIUM HE 5.000WH | 63 |
| 4.8 CÁLCULO DE AUTONOMÍA Y CAPACIDAD | 65 |
| 4.9 PROPUESTA DEL SISTEMA DE BATERÍAS | 69 |
| 4.9.1 BATERÍA DE SERVICIO | 69 |
| 4.9.2 BATERÍAS DE ALIMENTACIÓN | 70 |

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 5. PANELES FOTOVOLTAICOS | 72 |
|--|-----------|

| | |
|--|-----------|
| 5.1 INTRODUCCIÓN | 72 |
| 5.2 LOS PANELES FOTOVOLTAICOS | 72 |
| 5.3 PRINCIPIOS BÁSICOS | 73 |
| 5.4 PARÁMETROS PRINCIPALES | 74 |
| 5.5 CLASIFICACIÓN DE LAS PLACAS SOLARES FOTOVOLTAICAS | 77 |
| 5.5.1 PANEL MONOCRISTALINO | 77 |
| 5.5.2 PANEL POLICRISTALINO | 78 |
| 5.5.3 PANEL AMORFO | 78 |
| 5.6 DISTRIBUCIÓN DE LAS PLACAS SOLARES FOTOVOLTAICAS | 80 |
| 5.7 COMPARATIVA | 82 |
| 5.8 PRINCIPALES FABRICANTES DE PLACAS SOLARES FOTOVOLTAICAS | 83 |
| 5.9 CÁLCULO DE RENDIMIENTO Y DIMENSIONADO | 85 |
| 5.10 PROPUESTA DE MEJORA | 87 |

| | |
|---------------------------------|-----------|
| CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES | 88 |
|---------------------------------|-----------|

| | |
|---------------------|-----------|
| BIBLIOGRAFÍA | 95 |
|---------------------|-----------|

| | |
|---|------------|
| ANEXO A. FICHA TÉCNICA EMBARCACIÓN SOL DE MI VIDA | 100 |
| A.1 EMBARCACIÓN SOL DE MI VIDA | 100 |
| A.2 FICHA TÉCNICA MOTOR ACTUAL | 101 |
| A.3 FICHA TÉCNICA BATERÍAS ACTUALES | 102 |
| A.4 FICHA TÉCNICA PLACAS SOLARES FOTOVOLTAICAS ACTUALES | 104 |
| ANEXO B. CARACTERÍSTICAS MODELO USADO EN MAXSURF MODELER Y MAXSURF RESISTANCE. | 106 |
| B.1 MAXSURF MODELER | 106 |
| B.2 MAXSURF RESISTANCE | 108 |
| B.2.1 GRÁFICA POTENCIA-VELOCIDAD (P-V) PARA VELOCIDAD MEDIA | 108 |
| B.2.2 GRÁFICA POTENCIA-VELOCIDAD (P-V) PARA VELOCIDAD MÁXIMA | 108 |
| ANEXO C. BALANCES DE PESOS Y CONSUMO | 111 |
| C.1 BALANCE DE CONSUMOS | 111 |
| C.2 BALANCE DE PESO | 112 |
| ANEXO D. ESQUEMA REPRESENTATIVO DEL NUEVO SISTEMA DE PROPULSIÓN | 113 |
| D.1 ESQUEMA SISTEMA DE PROPULSIÓN | 113 |
| ANEXO E. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL NUEVO MODELO DE PROPULSIÓN. | 114 |
| E.1 FICHA TÉCNICA MOTOR ELCO PE-3 | 114 |
| E.2 FICHA TÉCNICA BATERÍA TORQEEDO POWER 48-5000 | 114 |
| E.3 PLANO BATERÍA TORQEEDO POWER 48-5000 | 115 |
| E.4 FICHA TÉCNICA PLACAS SOLARES FOTOVOLTAICAS PANASONIC | 116 |
| E.5 PLANO PLACAS SOLARES FOTOVOLTAICAS PANASONIC | 118 |

Listado de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Situación geográfica del Archipiélago de las Perlas en la República de Panamá. Fuente: M.Mellado, Universitat de Lleida [1] | 2 |
| Figura 2. Embarcación Sol de mi Vida. Fuente: www.eboat-panama.com [2] | 4 |
| Figura 3. Batería (LiFePO ₄) Fuente: www.zgnewenergy.com [3] | 6 |
| Figura 4. El efecto invernadero. Fuente: http://ingenieraiycomputacion.blogspot.com [12] | 11 |
| Figura 5. Emisiones de gases GEI procedente de las energías a nivel mundial (1990-2010). Fuente: https://maps.unfccc.int/di/map/ [13]..... | 15 |
| Figura 6. Ciclo de fabricación de una batería de litio. Fuente: Propia..... | 18 |
| Figura 7. Diagrama ambiental del reciclaje de las baterías de Plomo-Ácido. Fuente: http://repository.udistrital.edu.co [15] | 21 |
| Figura 8. Fotomontaje del planeta con placas solares. Fuente: www.conectatealsol.com/news [18] | 23 |
| Figura 9. Esquema de las principales maquinas eléctricas. Fuente: Propia | 25 |
| Figura 10. Gráfico (V-T) de corriente continua (Izquierda) y gráfico (V-T) de corriente alterna. Fuente: Propia | 27 |
| Figura 11. Gráfico (V-T) de una corriente alterna trifásica. Fuente: Propia | 28 |
| Figura 12. Clasificación de los tipos de motores eléctricos en función del origen de la corriente. Fuente: Propia..... | 28 |
| Figura 13. Líneas de campo magnético de un imán. Fuente: http://www.quora.com [22] | 29 |
| Figura 14. Representación de un electroimán. Fuente: http://www.incb.com.mx [23] | 30 |
| Figura 15. Funcionamiento de un motor de corriente continua (CC). Fuente: http://luisllamas.es [26] | 34 |
| Figura 16. Clasificación de los motores de corriente alterna (CA). Fuente: Propia | 34 |
| Figura 17. Conexión trifásica en estrella de los bobinados de un motor. Fuente: http://www.nheducation.es [24] | 37 |
| Figura 18. Conexión trifásica en triángulo de los bobinados de un motor. Fuente: http://www.nheducation.es [24] | 38 |
| Figura 19. Arranque mediante un autotransformador. Fuente: Maquinas eléctricas ETSEIB[25] | 39 |
| Figura 20. Clasificación de los motores de corriente alterna en función de la velocidad de giro del motor y la velocidad de sincronismo. Fuente: Propia..... | 40 |
| Figura 21. Clasificación de los motores síncronos. Fuente: Propia | 40 |
| Figura 22. Clasificación de los motores asíncronos. Fuente: Propia | 41 |
| Figura 23. Clasificación de los motores asíncronos alimentados con corriente monofásica. Fuente: Propia | 41 |

| | |
|--|-----|
| Figura 24. Clasificación de los motores asíncronos alimentados con corriente trifásica. Fuente: Propia... | 42 |
| Figura 25. Curva de descarga de una batería de Ion-Litio. Fuente: http://colmenarezjl.blogspot.com [33] | 51 |
| Figura 26. Funcionamiento de una batería de Ion-Litio. Fuente: Hernández, A. ETSI.[32] | 52 |
| Figura 27. Funcionamiento de una batería de Plomo-Ácido. Batería cargada (izquierda), batería descargada (derecha) Fuente: http://yachtmen.blogspot.com [35]..... | 54 |
| Figura 28. Funcionamiento de una batería de Sodio-Sulfuro. Fuente: Hernández, A. ETSI.[32] | 56 |
| Figura 29. Disposición en serie de dos baterías. Fuente: Propia..... | 59 |
| Figura 30. Disposición en paralelo de dos baterías. Fuente: Propia | 59 |
| Figura 31. Disposición en serie-paralelo de dos baterías. Fuente: Propia | 60 |
| Figura 32. Batería de servicio Super Cycle 12 V 90 Ah. Fuente: http://www.victronenergy.com [41] | 70 |
| Figura 33. Batería de alto rendimiento Torqeedo modelo Power 48-5000 de litio. Fuente: http://www.torqeedo.com [37]..... | 71 |
| Figura 34. Curva característica (I-V) de una placa solar fotovoltaica. Fuente: http://autosolar.es [43]..... | 74 |
| Figura 35. Placa solar fotovoltaica con células solares monocristalinas. Fuente: http://www.autosolar.es [46] | 77 |
| Figura 36. Placa solar fotovoltaica con células solares policristalinas. Fuente: https://www.wccsolar.net [47] | 78 |
| Figura 37. Panel solar flexible. Fuente: http://www.nousol.com [48] | 79 |
| Figura 38. Conexión mixta de módulos solares. Fuente: Propia | 81 |
| Figura 39. Comparativa entre un módulo solar policristalino (izquierda) y monocristalino (Derecha). Fuente: http://www.jardin-solar.blogspot.com [50] | 82 |
| Figura 40. Grafica Power-Speed mediante el método de Holtrop para la embarcación panameña Sol de mi vida. Fuente: Propia | 108 |
| Figura 41. Grafica Power-Speed, método de Holtrop a máxima velocidad. Fuente: Propia | 108 |
| Figura 42. Esquema del nuevo sistema de propulsión eléctrico-solar para la embarcación Sol de mi vida. Fuente: Propia | 113 |

Listado de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Dimensiones de la e-boat Fuente: Propia..... | 5 |
| Tabla 2. Datos técnicos de la actual batería de Ion-Litio. Fuente: Propia | 6 |
| Tabla 3. Datos técnicos motor Torqeedo 10.0 RL. Fuente: Propia..... | 7 |
| Tabla 4. Gráfico (A-V) de la transformación de DC a DC mediante un controlador MPPT. Fuente: www.victorenergy.com [8] | 8 |
| Tabla 5. Comparativa técnica entre motor Cruise 10.0 RL, Green Power y EP-30. Fuente: Propia..... | 45 |
| Tabla 6. Comparativa técnica entre baterías de Ion-Litio, Plomo-Ácido y Sodio-Sulfuro. Fuente: Hernández, A. ETSI.[32] | 57 |
| Tabla 7. Datos técnicos de la batería Torqeedo Power 48-5000. Fuente: Propia | 61 |
| Tabla 8. Datos técnicos de un banco de baterías constituidas por 4 baterías Torqeedo. Fuente: Propia... | 62 |
| Tabla 9. Datos técnicos de la batería Victron energy. Fuente: Propia..... | 63 |
| Tabla 10. Datos técnicos de un banco de baterías constituidas por 6 baterías Victron energy. Fuente: Propia | 64 |
| Tabla 11. Diferencia de autonomías con el uso de 4 y 6 baterías. Fuente: Propia..... | 68 |
| Tabla 12. Comparativa de los principales fabricantes de paneles solares. Fuente: https://www.sfe-solar.com [51] | 84 |
| Tabla 13. Tabla resumen precio y peso de los elementos de un sistema de propulsión eléctrico-solar. Fuente. Propia..... | 90 |
| Tabla 14. Comparativa de autonomías entre el banco de baterías actual y el propuesto. Fuente: Propia. | 93 |
| Tabla 15. Tabla resumen de las potencias y eficiencias obtenidas en el nuevo sistema de propulsión. Fuente: Propia..... | 93 |

Capítulo 1. Introducción

1.1 Sobre el proyecto

El presente proyecto se basa en el estudio técnico, económico y medioambiental de un nuevo sistema de propulsión eléctrico y solar, para una embarcación panameña de 6,7 m de eslora. Dicho sistema está formado por tres componentes principales; un motor eléctrico, encargado de propulsar la embarcación; un banco de baterías como fuente de alimentación tanto de los motores eléctricos como de los distintos aparatos electrónicos instalados a bordo y una serie de paneles fotovoltaicos, necesarios para recargar el banco de baterías. Este TFG se enmarca dentro del proyecto integrado en el Programa de Actividades de Cooperación de la UPC “Formación en navegación sostenible y evaluación de los usos energéticos y la sostenibilidad ambiental de la población de Isla Saboga (Panamá)”, proyecto desarrollado por la Universitat Politècnica de Catalunya y la Universidad Marítima Internacional de Panamá.

En primer lugar, y con el objetivo de familiarizarnos con la embarcación actual, se llevará a cabo un análisis técnico de las características que presenta la embarcación. Por un lado, se presentarán los datos y dimensiones de la barca “Sol de mi vida”, y por otro lado se analizarán los componentes que integran, actualmente, el sistema de propulsión.

En segundo lugar, y con la finalidad de ser capaces de proponer un nuevo sistema de propulsión eléctrico y solar, se realizará un estudio más profundo de sus principales elementos constituyentes. Separado por capítulos, primeramente, se estudiará el motor eléctrico, sus principios básicos y sus variaciones; posteriormente se analizarán las baterías marinas como acumuladores de energía, así como el cálculo de autonomía necesaria para proporcionar una mejor autosuficiencia eléctrica de la embarcación. Por último, se abarcará el tema del techo solar, constituido por 8 módulos solares fotovoltaicos. En su estudio, no solo se estudiará el funcionamiento de dichos módulos, sino que se obtendrá un cálculo de potencia para saber de forma orientativa, la cantidad de energía que puede ofrecerle a la embarcación. A su vez, y con el fin de obtener una familiarización con el sector de la industria energética solar, se realizará un estudio de mercado de los principales módulos solares, así como los distintos procesos de calidad a los que se someten para garantizar la mejor eficiencia posible. Al final del capítulo, igual que en los capítulos anteriores, se buscará una mejor calidad del producto, teniendo en cuenta la calidad de la materia prima y la tecnología

utilizada en la fabricación de cada módulo. De esta manera se garantizará que las prestaciones que presente la nueva propuesta superen las del producto actualmente instalado. La potencia, la eficiencia, la calidad o el precio son algunos de los factores que se intentarán mejorar.

En tercer lugar, se expondrá el coste económico que supondrá la instalación del sistema en cuestión y se comparará con el coste económico que supuso el conjunto propulsivo actual.

1.2 Motivación

Los motivos por los cuales he decidido embarcarme en el presente trabajo son varios. Por un lado, mi afición por la mecánica y los avances tecnológicos hacia un futuro sostenible y libre de emisiones de gases contaminantes a la atmósfera. Por otro lado, me entusiasma la idea de poder aportar soluciones a problemáticas reales relacionadas con el sector náutico y naval. El presente trabajo engloba todo lo descrito anteriormente y por eso, me dispongo a estudiar una posible propuesta de mejora para un sistema de propulsión eléctrico y solar para una embarcación situada en el golfo de Panamá.

1.3 Situación actual

Situado a 50 km de la capital, en la Bahía de Panamá se encuentra uno de los cuatro archipiélagos pertenecientes a la República de Panamá, el Archipiélago de las Perlas, nombre recibido por la abundancia de perlas en sus costas, a mediados de siglo XVI. Con un total de 100 islotes, 39 islas y una superficie de 1165 km², dicho archipiélago ha experimentado en los últimos 15 años, un creciente interés turístico. Como consecuencia, sus islas más importantes, así como las aguas de la bahía, se han visto afectadas por numerosos proyectos de carácter lucrativo y turístico.

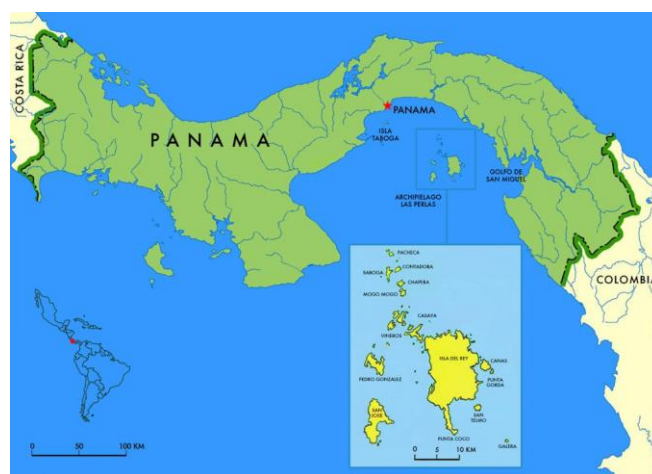


Figura 1. Situación geográfica del Archipiélago de las Perlas en la República de Panamá. **Fuente:** M.Mellado, Universitat de Lleida [1]

En la figura 1, se ve reflejada la localización geográfica del archipiélago de las Perlas dentro del Golfo de Panamá. En él, se pueden distinguir las principales islas que lo constituyen siendo las más importantes: la isla del Rey, siendo esta la más grande del archipiélago y la segunda de Panamá con una superficie de 234 km², isla San José con una superficie de 44 km² convirtiéndose en la segunda isla más grande del archipiélago e Isla Contadora, conocida por su gran actividad turística y hotelera.

La embarcación del presente trabajo es se sitúa en una de las islas de dicho archipiélago llamada Isla Saboga, con una superficie de 2,77 km² que, al igual que las demás islas y gracias a la gran biodiversidad que presentan sus aguas, su economía se basa en actividades tales como la pesca, el submarinismo y el turismo. [1]

El desplazamiento desde la costa panameña hasta las distintas islas se puede realizar mediante el uso de avionetas desde el mismo aeropuerto de Panamá, o bien mediante embarcaciones tipo ferry. Actualmente, todas las embarcaciones destinadas al transporte de turistas hasta el Archipiélago de las Perlas a través del Golfo de Panamá ya sean embarcaciones públicas o privadas, utilizan una propulsión tradicional de motores de dos tiempos de gasolina. Originalmente, la Bahía de Panamá, en el océano Atlántico, era frecuentado embarcaciones pesqueras locales, así como embarcaciones destinadas a actividades subacuáticas. Sin embargo, debido al auge turístico, el transito marítimo a aumentado considerablemente en los últimos 15 años, desencadenando un impacto medioambiental negativo al ecosistema local. Los principales problemas causados son:

1. Aumento de emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de la combustión de gasolina.
2. Derramamiento de sustancias tóxicas al océano contaminando las aguas locales.
3. Contaminación por el vertido de plásticos y otras sustancias procedentes de la actividad humana.
4. Un aumento de ruido y vibraciones causados por el uso de motores de combustión, provocando la desorientación y muerte de especies marinas.
5. Aumento de la posibilidad de accidentes marítimos.

Como respuesta reactiva a dichos acontecimientos, nace un proyecto sostenible en el que se intenta evitar el uso de dichos motores de combustión interna, sustituyéndolos por embarcaciones cuya propulsión se basa en el uso de energías limpias y renovables como la energía eléctrica y la energía solar.

El proyecto se basa en el uso de embarcaciones con propulsión eléctrica y solar para el transporte de turistas entre las distintas islas del Archipiélago de las Perlas, así como puntuales desplazamientos hasta las costas panameñas. Su propulsión se basa en el uso de motores eléctricos y placas solares para conseguir una navegación libre de emisiones de CO₂, ruidos y vertidos tóxicos al medio ambiente.

1.4 Embarcación actual

En el presente apartado, se realizará un resumen de la embarcación, cuyo sistema de propulsión será objeto principal de estudio y que, posteriormente, se propondrá un nuevo modelo. De primera instancia, se definirán las principales dimensiones de la embarcación “Sol de mi vida” para, posteriormente poder definir los distintos elementos que constituyen su sistema de propulsión.

Como se ha dicho en el apartado anterior, las presentes embarcaciones están pensadas para desplazar un máximo de 10 personas por las distintas islas e islotes que constituyen el archipiélago. Puntualmente, presenta la necesidad de navegar hasta las costas panameñas, un trayecto de aproximadamente 40 millas náuticas. Con una propulsión 100% eléctrica y solar, la e-boat llamada “sol de mi vida”, permite una navegación silenciosa y libre de emisiones a la atmosfera, gracias a un motor eléctrico de la marca alemana Torqeedo, alimentado con un banco de baterías de LiFePO₄ y un techo solar compuesto por 8 paneles fotovoltaicos de la marca Virtus de 250 W de potencia. [2]

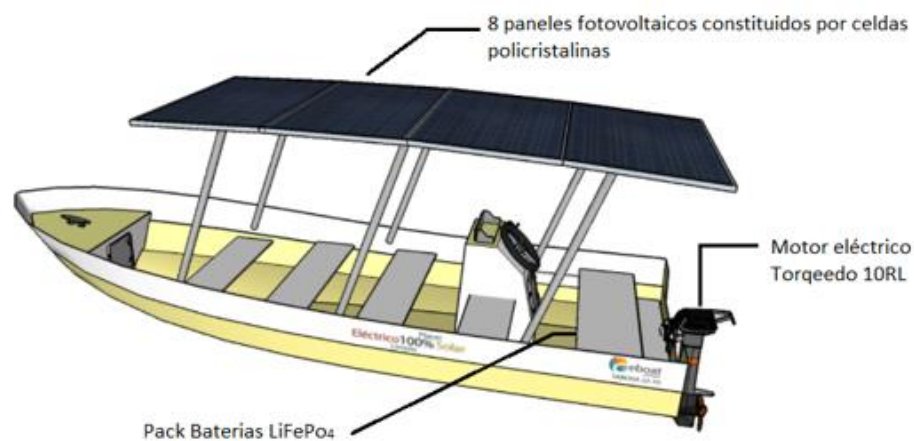


Figura 2. Embarcación Sol de mi Vida. Fuente: www.eboat-panama.com[2]

1.4.1 Datos técnicos de la embarcación

La e-boat “Sol de mi Vida”, presenta unas líneas de diseño que la clasifican como un tipo de embarcación llamada Panga. Son comunes en la zona litoral del océano Pacífico, centro América y las Islas del Caribe. Se caracterizan por tener un casco plano construido íntegramente por fibra de vidrio (7 capas por la parte inferior y 5 capas en los labios del casco). Sus dimensiones de 6,7 metros de eslora, con una manga de 1,95 m, un calado 0,2 m y un puntal de 0,9 m, permiten un aforo de hasta 10 personas. En la siguiente tabla, se ven reflejados los datos técnicos.

| Datos técnicos [2] | |
|--------------------------|-----------------|
| Eslora | 6,7 m |
| Manga | 1,95 m |
| Calado | 0,2 m |
| Puntal | 0,9 m |
| Material | Fibra de vidrio |
| Desplazamiento con carga | 1.811,3 kg |
| Desplazamiento sin carga | 550 kg |
| Propulsión | Eléctrica-solar |
| Personas a bordo | 10 |
| Motor | Torqueedo |
| Potencia del motor | 5.600 W (20 HP) |
| Velocidad máxima | 7 nudos |
| Velocidad media | 6 nudos |

Tabla 1. Dimensiones de la e-boat **Fuente:** Propia

El sistema propulsivo está dotado de un motor eléctrico fueraborda de la marca alemana Torqeedo. Dentro de su amplia gama, hace referencia al modelo Cruise 10.0 RL. Un banco de baterías de litio de fosfato de hierro (LiFePO₄), con un total de 16 packs de baterías y un techo solar fijo compuesto de 8 paneles fotovoltaicos de 2,5 kW de potencia de la marca Virtus. [2]

A continuación, se dispone a definir por partes los principales elementos del sistema de propulsión descritos anteriormente.

Baterías

El sistema de alimentación, tanto de los instrumentos eléctricos instalados a bordo, como del motor eléctrico, está constituido por 16 packs de baterías de fosfato de litio (LiFePO₄) recubiertas por una funda de aluminio. En su forma más simple, una batería es un acumulador de energía eléctrica que, en consecuencia, de una reacción química, presentan la capacidad de almacenar electricidad y distribuirla en corriente continua.

La embarcación consta de 16 packs en serie de 6 células en paralelo, es decir, un total de 17 kW. Cada célula tiene un voltaje de 3,2 V y una intensidad de 60 A.

| Datos técnicos de las baterías | |
|--------------------------------|--------------------------|
| Fabricante | Zgnewenergy CO., Ltd [3] |
| Capacidad nominal | 60 Ah |
| Voltaje nominal | 3,2 V |
| Corriente nominal de carga | 20 A (1/3C) |
| Corriente de carga máxima | 90 A (1,5C) |
| Voltaje de carga nominal | 6,65 V |
| Corriente nominal de descarga | 20 A (1/3C) |
| Corriente máxima de descarga | 180 A (3C) |
| Impedancia | ≤2mΩ |
| Peso | 1,685 kg/batería |

Tabla 2. Datos técnicos de la actual batería de Ion-Litio. **Fuente:** Propia



Figura 3. Batería (LiFePO₄) **Fuente:** www.zgnewenergy.com[3]

El término “C” mostrado en la Tabla 2, se asocia a la capacidad que tiene una batería. Para definirla, se plantea el siguiente caso hipotético: teniendo una batería completamente descargada y se le hace llegar una corriente (I) en un intervalo de tiempo (T).

Aplicando la definición del corriente eléctrico como el coeficiente del flujo de cargas que interaccionan en la reacción química de una batería en el intervalo T:

$$I = \frac{Q}{T}$$

Siendo Q la carga, T el tiempo que transcurre durante el desplazamiento de la carga, carga o descarga según el sentido de la corriente, en una batería. De esta manera, si aislamos la Q, encontramos una manera de cuantificar la capacidad de una batería. [4]

$$Q = I \times T \quad (1)$$

Por lo que:

$$C = I \times T \text{ [A/h]}$$

Motor eléctrico

El motor que actualmente se está utilizando para propulsar la embarcación panameña es un motor eléctrico fueraborda del fabricante alemán Torqeedo. Hace referencia al modelo Cruise 10.0 RL. Con 5,6 kW de potencia máxima, 10 kW de consumo y un empuje equiparable a un motor de combustión de 20 CV. Este motor permite a la embarcación navegar a una velocidad lenta de 4,2 nudos (7,8km/h) y una velocidad máxima de 17,2 nudos (31,9 km/h)¹. Dentro de la gama del modelo, presenta una caña de 51,2 cm y un peso total de 62,5 kg, teniendo en cuenta que no lleva instalados baterías en su interior. En la Tabla 3, se ven reflejados los datos técnicos del motor.[5]

| Datos técnicos del motor | |
|--------------------------|--|
| Motor | Torqeedo [5] |
| Modelo | Cruise 10.0 RL |
| Consumo | 10kW |
| Eficiencia | 56% |
| Potencia de propulsión | 6,4 kW |
| Tensión nominal | 48 V |
| Peso | 61,5 kg |
| Rpm | 1.400 rpm |
| Refrigeración | Refrigeración por agua |
| Imagen |  |

Tabla 3. Datos técnicos motor Torqeedo 10.0 RL. **Fuente:** Propia

¹ Según el tipo de embarcación así como su carga. Dichos valores se verán afectados por las condiciones ambientales o el tipo de hélice instalada en el motor.

Paneles fotovoltaicos

La embarcación dispone de un techo solar con una superficie plana de 17 m², donde hay instalados 8 paneles fotovoltaicos Virtus constituidos por celdas policristalina 156 x 156 mm, 60 (6 x 10) piezas en serie. Estos paneles, contruidos con cristal templado de alta transmisión y bajo contenido en hierro, presentan una serie de características en las que encontramos una potencia máxima de 250 W y una eficiencia del módulo de 15,4% de la energía de irradiación, por placa. Estas placas solares, alimentan el pack de baterías de la embarcación a través de un cable de salida de 4 mm² (UE)/12 AWG (EE.UU.), 1000 mm. [6]

Teniendo en cuenta que con una irradiancia de 1000 W/m² cada panel fotovoltaico presenta un rendimiento del 16% de su capacidad, encontramos que por cada placa:

$$1000 \times 0,16 = 160 \text{ W}$$

Teniendo en cuenta que la embarcación dispone de 8 placas fotovoltaicas, obtenemos un total de 1.280 W de potencia procedentes de las placas solares. En cuanto a corriente, sabemos que, por cada placa fotovoltaica, obtenemos un I_{mp} (Máxima carga de suministro) de 8,31 A, y un total de 66,48 A.

Mediante un controlador de carga MPPT (Maximum Power Point Tracker), se consigue conectar las placas solares al pack de baterías y así, conseguir que estas puedan cargarse de energía eléctrica para su uso. El controlador MPPT ajusta su tensión de entrada para recoger el máximo de la energía solar de los paneles solares y de esta manera transformar la energía para alimentar las distintas tensiones solicitadas, tanto de la batería como de las cargas.[7]

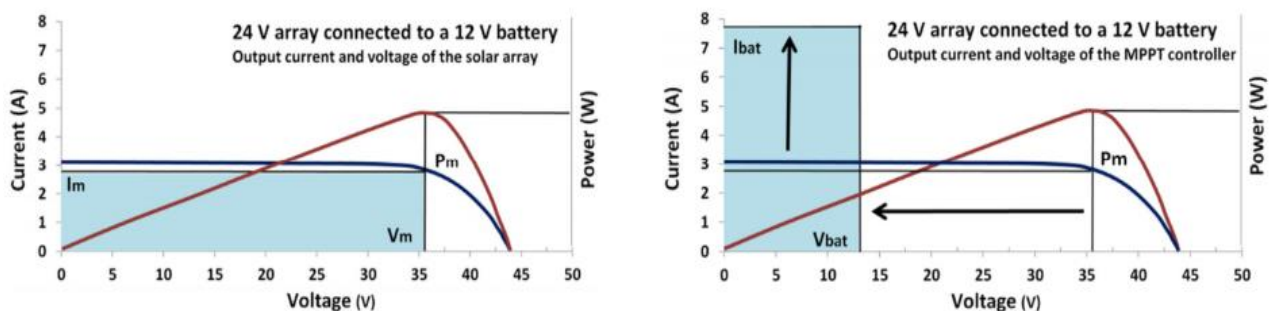


Tabla 4. Gráfico (A-V) de la transformación de DC a DC mediante un controlador MPPT. **Fuente:** www.victorenergy.com [8]

Capítulo 2. Estudio medioambiental

2.1 Introducción

En el presente capítulo se analizará y se estudiará el impacto medioambiental que supone, no solo la navegación de las embarcaciones eléctricas, sino que se analizarán parte por parte, el impacto medioambiental que supone la fabricación de motores eléctricos, baterías marinas y paneles solares fotovoltaicos, siendo estos los elementos principales de un sistema de propulsión eléctrico y solar para una embarcación de recreo.

Como hemos podido observar en el capítulo anterior la embarcación estudiada en el presente trabajo, destinada al transporte de personas entre las costas de Panamá hasta el Archipiélago de las Perlas, utiliza una propulsión basada en la libre emisión de gases de efecto invernadero, presentando una navegación limpia y silenciosa, que innova en su zona de trabajo apostando por las energías renovables. Sin embargo, que sus emisiones de gases a la atmosfera sean reducidas, o que la contaminación acústica sea prácticamente nula, no significa que este tipo de propulsión resulte ser no contaminante al 100%.

A continuación, se procede a analizar qué impacto medioambiental provoca el uso de este tipo de tecnología, una nueva vía de estudio que, en teoría, resultan ser no contaminantes para el plantea.

2.1.1 Marco teórico

Con la entrada del nuevo siglo, surgieron grandes problemas relacionados con el medio ambiente y se empezaban a notar las graves consecuencias de la interacción humana con los recursos naturales del planeta. Ya a finales de siglo, la preocupante situación hizo reaccionar a un ser humano preocupado por el acelerado calentamiento global causado por el cambio climático casi irreversible.

A raíz de los acontecimientos, se organizaron conferencias mundiales sobre el medio ambiente y el clima (junio de 1988 y agosto de 1990) con la finalidad de concienciar a los países en pleno auge industrial y científico, sobre el agravante problema del cambio climático y donde se proponían posibles soluciones al problema.

En el mismo año que se celebró la segunda conferencia mundial, la ONU establece el Comité Negociador del Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC) (Nueva York, 1992). Su principal objetivo era conseguir estabilizar la concentración de gases con efecto invernadero en la atmósfera terrestre, reduciendo las emisiones de CO₂ en un 60% con respecto a los niveles registrados a finales de 1990. [9]

Cumbre de la Tierra (Río de Janeiro, junio de 1992)

Entre el 3 y 14 de junio de 1992, se reúnen en Río de Janeiro, los principales jefes de estado, así como los países industriales más evolucionados del momento, concertando uno de los acontecimientos ecológicos y ambientales más importante hasta la fecha. En él, los países involucrados (a excepción de unos Estados Unidos liderado por Jorge Bush) se comprometen a reducir sus emisiones de gases de efectos invernaderos, aplicando nuevos protocolos y planes de acción en sus empresas y gobiernos, enfocados a la protección y perduración del medio ambiente. A este evento se le conoce por ser el principal impulsor a nivel mundial, en querer poner solución al grave problema relacionado con el medio ambiente. A su vez, el comité UNFCCC, se compromete a reducir las emisiones de CO₂ para el año 2000.[9]

Cumbre de Kioto (Japón, diciembre de 1997)

Tras varios y grandes esfuerzos a nivel mundial en la implementación de protocolos y encuentros en distintas cumbres (Cumbre de Berlín y Cumbre de Ginebra por las partes de la UNFCCC) en 1997 se lleva a cabo la Cumbre de Kioto, tercera conferencia donde la ONU aprobó el protocolo de Kyoto.

Este protocolo lo constituye un documento formado por 28 artículos y 2 Anexos en los que un total de 163 países representantes de las principales economías mundiales, acuerdan cumplir una serie de objetivos con el fin de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un periodo de 2008-2012. Cada país le corresponde un porcentaje distinto a disminuir en función de los gases producidos en el año 1999.

Los principales GEI (Gases de Efecto Invernadero), causantes del acelerado calentamiento global. Los principales GEI son:[10]

- Dióxido de carbono (CO₂)
- Metano (CH₄)
- Óxido Nitroso (N₂O)
- Hidrofluorocarbonos (HFC)
- Perfluorocarbonos (PFC)
- Hexafluoruro de azufre (SF₆)

2.1.1 Gases de efecto invernadero

Los gases de efecto invernadero, también conocidos como GEI, son aquellos gases presentes en la atmósfera terrestre, con la capacidad de absorber parte de la radiación infrarroja procedente del sol (longitud de onda larga) y a su vez, emitir al exterior la radiación procedente de la Tierra (longitud de onda corta) provocando en la superficie terrestre un efecto invernadero. La presencia de estos gases, generan un calentamiento progresivo del planeta, generando gradientes de temperatura estables. Este fenómeno se conoce como calentamiento global y resulta de vital importancia para el desarrollo de los procesos biológicos y bioquímicos que permiten la vida en el planeta. Sin su existencia, la temperatura del planeta sería 33° inferior a la media actual, registrándose una media de -18°, fenómeno físico que impediría la existencia de vida. [11]

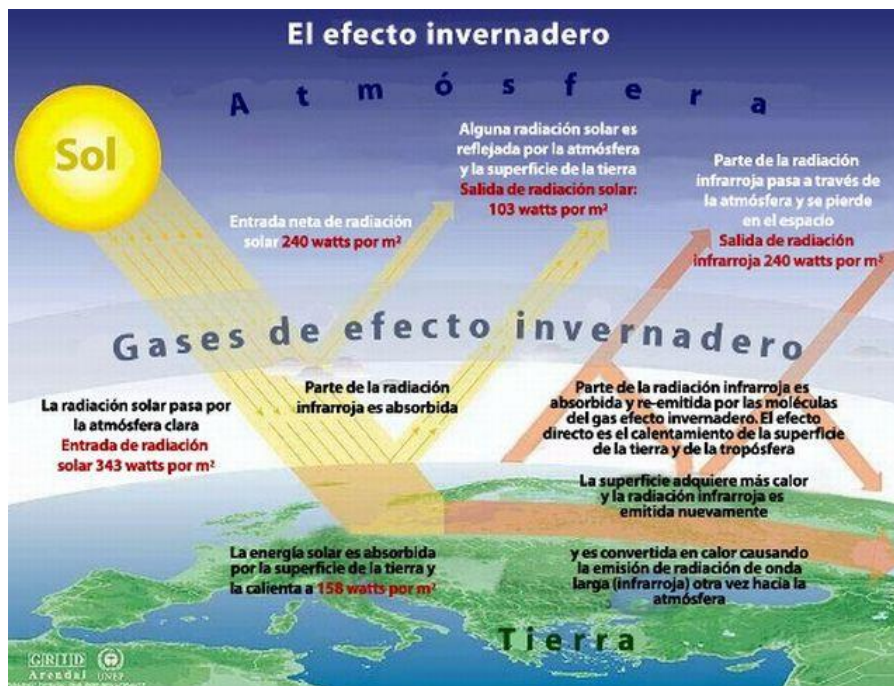


Figura 4. El efecto invernadero. **Fuente:** <http://ingenieriaycomputacion.blogspot.com>[12]

Los gases de efecto invernadero se encuentran distribuidos equilibradamente por las distintas capas atmosféricas. En dicho equilibrio intervienen fenómenos geofísicos tales como el ciclo del agua, ciclo del carbono y corrientes procedentes del océano, que garantizan su equilibrio natural.

Su origen puede ser natural o antropogénico, es decir, como consecuencia de la actividad humana. La descontrolada emisión de gases GEI de origen antropogénico son los causantes principales del presente desmesurado calentamiento global. [11]

El rápido aumento de temperaturas se está produciendo en un intervalo de tiempo tan corto, que la naturaleza no es capaz de regular de forma natural su estabilidad inicial, provocando daños irreversibles como la destrucción de ecosistemas y la extinción de especies animales, que no logran adaptarse al nuevo clima.

Como solución a esta situación descontrolada, la atmosfera trata de regular el aumento de temperaturas creando lo que se conoce como cambio climático de origen antropogénico. Este cambio, se caracteriza por el aumento de la temperatura global, desencadenando una serie de fenómenos naturales tales como: aumento de nivel del mar, grandes precipitaciones, acontecimientos climáticos extremos, y que al ser humano le afectará tanto directamente (daños físicos en infraestructuras) como indirectamente (repercusión en la agricultura, en el acceso a recursos naturales y repercusión en la economía mundial debido a la inestabilidad).

2.2 Impacto medioambiental de la energía eléctrica

La energía eléctrica está considerada como una de las energías naturales más limpias, debido a que no genera ningún tipo de residuo contaminante, así como emisiones de gases de efecto invernadero. A su vez, su transporte tampoco resulta ser un factor contaminante, ya que la energía eléctrica se transporta mediante la electricidad.

Dicha electricidad, resulta hoy en día de vital importancia para el desarrollo de la sociedad, siendo uno de los candidatos principales en la sustitución del combustible, sustancia altamente contaminante para el medio ambiente. Gracias a la electricidad, el ser humano ha podido realizar grandes avances en el área de la investigación, marcando un antes y un después en ámbitos tales como la ciencia, la tecnología, las industrias, áreas domésticas, tecnologías limpias, iluminación, y un sinnúmero de aplicaciones.

Por contraposición, el hecho que la energía eléctrica resulte ser una energía limpia, no significa que conlleve algún tipo de contaminación externa. Como en la mayoría de los procesos en los que interviene el ser humano, la generación, extracción y distribución de energía eléctrica dan lugar a una serie de impactos negativos al medio ambiente. Para su generación, es necesario el uso y el consumo de recursos naturales, normalmente combustibles fósiles, que generan un impacto en el ambiente debido a:

- Emisión de gases GEI tales como el óxido de carbono (CO_2) y óxido nitroso (N_2O).
- Gran consumo de agua en sus procesos de refrigeración.
- Formación de residuos nucleares.
- Transformación negativa del terreno local.
- Flora y fauna.

Por lo tanto, se puede decir que, aunque la energía eléctrica sea una fuente de energía limpia para el planeta, las consecuencias de las actividades humanas en los distintos procesos de tratamiento de esta energía (generación, extracción y transporte) provoca una serie de impactos ambientales tanto a nivel global como a nivel local. [12]

2.2.1 Impacto a nivel global

A nivel global, el impacto medioambiental que supone la actividad humana afecta principalmente a la biodiversidad del planeta y al cambio climático, debido a la emisión de partículas con efecto invernadero, tal y como se redactó en el protocolo de Kyoto (apartado 2.1.2 del presente capítulo).

A. Modificación o extinción de pérdida de hábitats naturales

Para la extracción de la energía eléctrica procedente del suelo terrestre, el ser humano emplea distintos procesos de extracción en los que se usa maquinaria e instalaciones que alteran los ecosistemas manipulados. La introducción de infraestructuras ajenas al paisaje natural, provocan una alteración en la naturaleza que puede provocar la pérdida o extinción del hábitat natural. Entre ellos, se observa un cambio en las aguas presentes en la zona, convirtiéndolas en aguas lentas o semi-lacustre alternado los procesos bioquímicos típicos en los ríos y embalses.

En una generación hidráulica, se generan grandes vertidos de fertilizantes y sedimentos, así como aguas residuales que generan una concentración irregular y elevada de fosfatos y nitrógeno, provocan la eutroficación de las aguas, estimulando el crecimiento de algas y bacterias en la superficie de los ríos. Dichas aguas acaban en el océano, contaminándolo desde el punto en que nacen los embalses necesarios para la generación de energía.[12]

B. Perturbación a la flora y fauna

La instalación de toda la infraestructura, así como de la maquinaria necesaria para la extracción de la energía eléctrica, puede provocar la muerte o extinción de ejemplares animales, así como plantas, debido a:

- a. Muerte de aves debido a colisiones con la infraestructura (instalación eólica)
- b. Muerte de ejemplares animales a causa de presencia humana (atropellos, caza)
- c. Migración de especies debido a ruidos y olores, o cambios del clima debido a los residuos generados por la instalación
- d. Variaciones de caudales de ríos debido a la instalación de presas hidráulicas (energía hidráulica)
- e. Descargas térmicas en los suelos manipulados (centrales térmicas)

C. Cambio climático mediante las emisiones de gases de efecto invernadero

De los 6 gases de efecto invernadero GEI incluidos en el Protocolo de Kioto en el año 1997 (apartado 2.1.2), 5 son los emitidos a lo largo del proceso que conlleva la generación de energía eléctrica. Dichos gases son:

- a. **Dióxido de carbono (CO_2)** emitido durante el consumo de combustibles fósiles tales como el petróleo, carbón, gas natural y derivados. También se emiten durante la instalación de maquinaria y construcción de las infraestructuras necesarias para la extracción de esta energía de recursos naturales.
- b. **Óxido de Nitrógeno (N_2O)**, se generan en la producción de ácido nítrico y ácido adípico. También forman parte de la composición de numerosos fertilizantes que se vierten en aguas cercanas como ríos o lagos. En el caso de la extracción de energía eléctrica, se usa en la quema de combustibles fósiles.
- c. **Metano (CH_4)**, también procedente del consumo de combustibles fósiles. A diferencia del CO_2 y N_2O , que se generan en la quema de dichos combustibles, el metano se emite a la atmósfera durante el transporte y suministro, debido principalmente a fugas. La emisión de CH_4 es inferior a los gases mencionados anteriormente, aun así, su impacto medioambiental provoca un aceleramiento del calentamiento global desmesurado.
- d. **Hexacloruro de azufre (SF_6)**, emitido al medio debido a fugas en la producción de espumas y sustancias químicas que se acaban vertiendo en aguas de la zona. Se utilizan como aislante en conmutadores eléctricos e interruptores automáticos. También en aerosoles.
- e. **Hidrocarburos (HFC_6)**, usados como refrigerantes para evitar sobrecalentamiento en las instalaciones, por la quema de combustibles fósiles. También se utilizan en extintores y aerosoles, al igual que el Hexacloruro de azufre.

La emisión de estos tipos de gases contribuye a la destrucción de la capa de ozono, siendo esta el escudo natural de la Tierra contra objetos y o cuerpos del espacio exterior.

Situada a 50 km de la superficie terrestre, en la estratosfera, está constituida principalmente por moléculas de ozono (O_3) y es de vital importancia para que haya vida en el planeta. A parte de provocar la degradación de objetos que tratan de introducirse en nuestra atmosfera, sus moléculas de ozono tienen la capacidad de redirigir gran parte de la radiación solar, haciendo que, la que finalmente llega sobre nuestra superficie sea menos dañina para los seres humanos.

A consecuencia de la constante emisión de gases clorofluorocarbonos, también conocidos como CFC (gases más destructivos de la capa de ozono) y de gases de efecto invernadero, se ha creado una reducción de moléculas de ozono llamada agujero de la capa de ozono, que permite la entrada de grandes cantidades de radiación solar a nuestros ecosistemas.[12]

Este fenómeno provocado mayoritariamente por la actividad humana resulta ser altamente peligroso provocando enfermedades a los seres vivos y la destrucción y destrucción de hábitats naturales como los polos, principales puntos fríos del planeta que actúan como refrigerante natural.

Como consecuencia al deshielo de los polos, el nivel del mar sube cada año provocando inundaciones devastadoras y un aumento de las temperaturas, agravando el calentamiento global y el cambio climático.

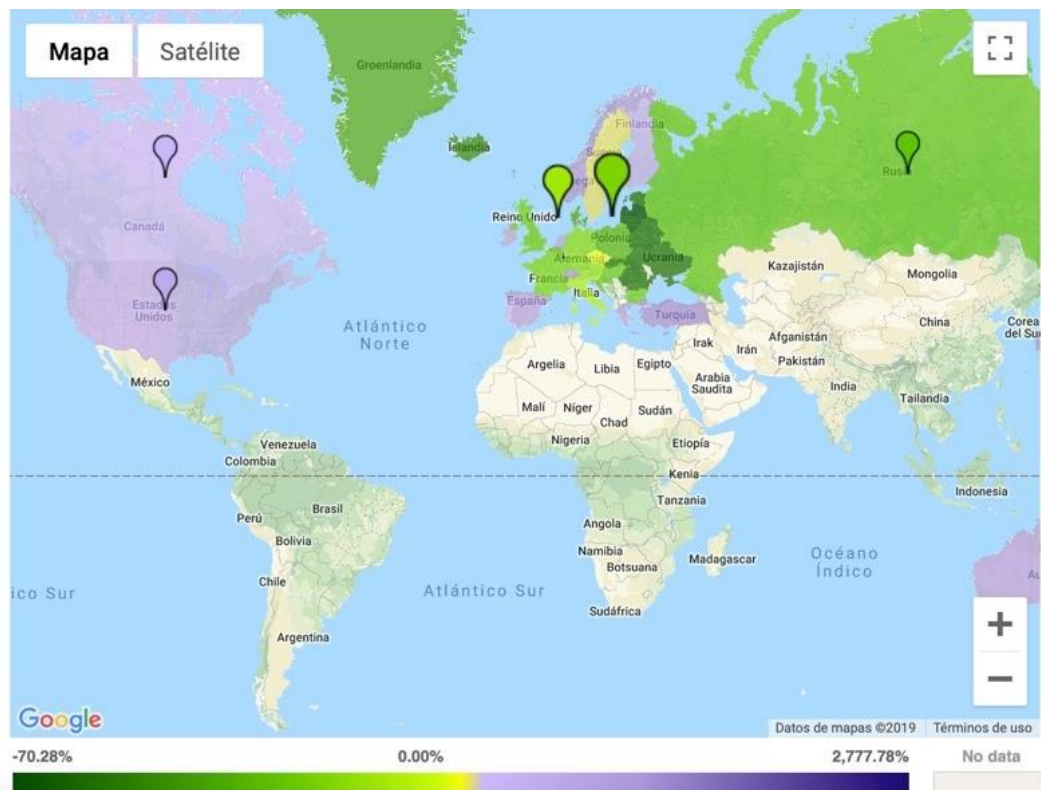


Figura 5. Emisiones de gases GEI procedentes de las energías a nivel mundial (1990-2010). **Fuente:** [https://maps.unfccc.int/di/map/\[13\]](https://maps.unfccc.int/di/map/[13])

En la figura 5 mostrada anteriormente, se puede observar un mapamundi donde se representan las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel global, procedentes de la energía industriales. En el mapa, se analizan los países de la unión europea (UE) en un periodo de tiempo que va entre 1990 y 2010.

2.2.1 Impacto a nivel local

Recurso natural cada vez más escaso, para los sistemas de refrigeración de las instalaciones, combustibles fósiles como carbón y petróleo para la generación de energía eléctrica y terrenos naturales para la instalación de las infraestructuras, generando la tala de árboles, detonaciones en montes y montañas para allanar el terreno.

En cuanto al consumo de agua, parte del agua es devuelta a su origen, pero al haber sido tratada térmica y químicamente, sufren alteraciones en la temperatura, provocando un impacto negativo al medio acuático. La concentración de sustancias químicas en el agua provoca la intoxicación de aguas locales y las especies que viven o se alimentan de ella. [12]

A. Emisiones

Tal y como se ha explicado en el apartado 2.2.1, la generación de energía eléctrica conlleva un impacto medioambiental a nivel global debido a las emisiones de 5 de los 6 principales gases de efecto invernadero. Dichas emisiones contribuyen al acelerado calentamiento global y un cambio climático devastador.

A nivel local, la emisión de los gases descritos anteriormente, así como otro tipo de óxidos de azufre (SO_2 y SO_3), desencadenan una serie de fenómenos que resultan nocivos para el medio ambiente que les rodea, afectando durante kilómetros la flora y la fauna. Un ejemplo de este tipo de fenómenos es la lluvia ácida.

Durante la combustión de carbón con altos contenidos de azufre en su composición, se liberan óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno que, al reaccionar con agua y el oxígeno, crea soluciones diluidas de ácido nítrico y ácido sulfúrico. Altas concentraciones de estas sustancias químicas en la atmósfera, provoca precipitaciones de lluvia ácida que conllevan consecuencias nocivas para el entorno, afectando gravemente a los lagos, ríos y cualquier medio acuático.

La lluvia ácida contamina tanto la fauna como la flora, provocando la muerte de bosques debido a la debilidad causada en los árboles y especies animales que no toleran esas concentraciones de ácido.

El anhídrido sulfúrico (SO_3) se crea mediante la oxidación del anhídrido sulfuroso en los humos de chimeneas industriales, emitiendo cantidades de alrededor de 0,1-0,4 t/h en la combustión de fuelóleo y de 0,25 t/h en la combustión de carbón con concentraciones de azufre. [12]

B. Impacto visual

La generación de energía eléctrica supone la construcción de grandes instalaciones tales como molinos de viento en instalaciones eólicas, presas hidráulicas en centrales hidráulicas y grandes maquinarias en las instalaciones térmicas. Todo ello conlleva un impacto visual a nivel local ya que modifica considerablemente el estado original de un hábitat, alterando el paisaje causando la desorientación de animales, o la muerte por los peligros que conlleva la construcción de sus conjuntos.

En cuanto al transporte de la energía eléctrica mediante electricidad, su impacto visual afecta a lo largo de kilómetros debido a la instalación de redes y cables eléctricos sostenidos por altas torres de distribución eléctrica. A su vez, las altas instalaciones causan la muerte de aves por impactar contra las redes y las torres de distribución.

C. Impacto auditivo

Este tipo de impacto se genera mediante ruidos asociados a la generación y extracción de la energía eléctrica. Sin embargo, este no será el mismo dependiendo del tipo de instalación y la manera en que dicha energía se extrae. Como consecuencia a estas perturbaciones, genera la migración de especies a otros hábitats produciendo una alteración de la biodiversidad.

D. Generación de vertidos

Como en toda actividad humana, sus consecuencias conllevan la generación de vertidos, en este caso, nocivos para el medio ambiente. Estos son como consecuencia, tanto directa como indirecta a los procesos de generación de energía. Estos vertidos pueden ser desde aguas de refrigeración con sustancias químicas en su composición, a sustancias procedentes de los equipos de limpieza de las propias plantas. [12]

2.3 Impacto medioambiental en la fabricación de baterías

El uso de baterías en una embarcación es imprescindible para el almacenamiento y la distribución de la electricidad necesaria para alimentar los distintos instrumentos instalados a bordo, que facilitan al ser humano su navegabilidad por los océanos. Las baterías dan la capacidad a una embarcación de ser autosuficiente ya que, hoy en día, la mayoría de los métodos de comunicación, iluminación, geolocalización, fondeo, amarre, etc. serían imposibles sin electricidad. De alguna manera, el ser humano se ha vuelto dependiente de la energía en gran parte de su vida cotidiana. En el caso de la navegación, dicha energía es la energía eléctrica.

En la industria naval, el tipo de batería más empleada son las baterías de plomo, también conocidas como Plomo-Ácido. Recibe este nombre porque, la composición de sus electrodos es de plomo (Pb)

mayoritariamente y la composición del electrolito está compuesto por una disolución de ácido sulfúrico (H_2SO_4) en agua (H_2O). [4][14]

Aunque hoy en día, estos tipos de baterías son 100% reciclables, los procesos que se llevan a cabo desde la extracción de la materia prima hasta el fin de la vida del producto suponen un gran impacto medioambiental por una serie de razones que se explican a lo largo del presente apartado. El ciclo de fabricación de una batería es el siguiente:

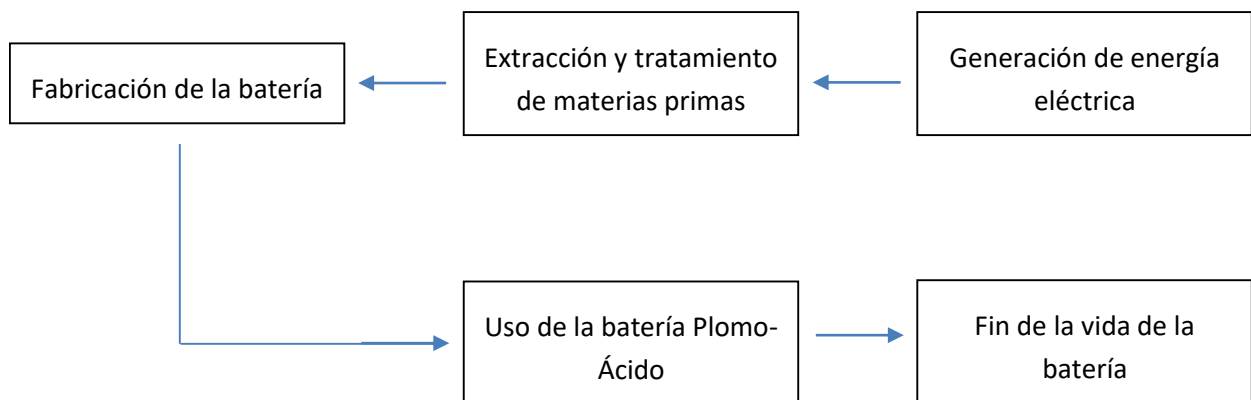


Figura 6. Ciclo de fabricación de una batería de litio. **Fuente:** Propia

Las baterías de Ácido-Plomo son las más comercializadas en el sector naval debido a su madurez tecnológica. Se caracterizan por soportar grandes descargas a un alto nivel de rendimiento y un precio muy asequible. El uso de este tipo de baterías se debe también a la materia prima que las constituye, el plomo. Este metal se encuentra en abundancia en la natura y su extracción no resulta ser muy laboriosa.

Por contraposición, a partir de ciertas cantidades de este elemento (Pb) en la atmósfera, puede resultar nocivo y altamente tóxico para el medio ambiente, así como para nuestro organismo, pudiendo llegar a ser letal. Este tipo de metal se transmite a la atmósfera mediante gases.

En el apartado 2.2.1, se ha hablado del impacto medioambiental que supone la actividad humana en la generación de energía eléctrica. Se ha visto también que es la fase inicial del proceso de obtención de las baterías, por lo que a continuación, se describirá el impacto ambiental que supone las siguientes fases del proceso.

A. Generación de energía eléctrica

En el apartado anterior se ha visto como la generación de energía eléctrica supone un gran impacto medioambiental con alcances tanto globales como locales. Pese a que este tipo de energía está catalogada como una energía limpia, la actividad humana en el proceso de su obtención desencadena una serie de impactos negativos para el medio que le rodea.

Los principales impactos que se llevan a cabo es el uso desmesurado de recursos naturales cada vez más escasos, tales como el agua. A parte, su uso conlleva una contaminación que provoca otros daños colaterales tales, como la intoxicación de la flora y la fauna que la consumen. Por otro lado, el uso de combustibles fósiles para la generación de energía provoca la emisión de grandes cantidades de gases de efecto invernadero, provocando el calentamiento global. [14][15]

B. Extracción de materias primas

A parte de la generación de energía eléctrica, el ser humano necesita materias para la construcción de los elementos principales de las baterías. Algunas de estas materias se encuentran en la naturaleza, como por ejemplo el plomo, el silicio, el calcio, o el estaño. Por otro lado, también existen materias primas de origen vegetal, como el plástico, el caucho sintético o el PVC.

Durante los procesos de extracción y tratamiento de materias primas, se genera un gran impacto medioambiental tales como:

- a. Emisión de gases contaminantes y de efecto invernadero.
- b. Destrucción de hábitats naturales durante las explotaciones de plomo y caucho.
- c. Uso de recursos naturales escasos como el agua, provocando su contaminación.
- d. Creación de vertidos tóxicos, resultado de los residuos de laboratorios e instalaciones durante la elaboración de plásticos, ácido sulfúrico, y materiales sintéticos necesarios para la construcción de las baterías.
- e. Detonaciones y deformación del terreno natural para facilitar la construcción de instalaciones.
- f. Afectaciones a la flora y la fauna.

C. Fabricación de la batería.

Durante los procesos de fabricación de una batería también se produce emisiones de CO₂ a la atmósfera.

Debido a que la materia prima en sí es altamente tóxica, como es el caso del plomo o el plástico, los residuos que generan las fábricas y empresas destinadas a la fabricación de este tipo de baterías, también serán altamente tóxicos para el medio ambiente. [15]

A lo largo del proceso de fabricación, el uso de sustancias químicas es abundante y eso genera una serie de emisiones que resultan contaminantes. Alguno de los procesos en lo que se utilizan sustancias químicas son:

- a. Elaboración de óxido de plomo, necesario para obtener los electrodos de este tipo de batería
- b. Tratamiento del plomo, elemento químico altamente tóxico
- c. Durante los tests de calidad: Procesos de carga y descarga mediante el uso de ácido
- d. Construcción de los elementos principales, tratados químicamente a lo largo del ciclo de producción.

D. Consumo/uso del producto

Tal y como se ha explicado al inicio del presente apartado, las baterías son los elementos encargados del almacenamiento y distribución de energía eléctrica en forma de electricidad, a los distintos dispositivos electrónicos. En una embarcación, se utilizan para la puesta en marcha del motor, así como de su alimentación durante el funcionamiento en el caso de motores eléctricos, y para alimentar todos los sistemas y aparatos electrónicos instalados a bordo que permiten al ser humano, navegar con seguridad.

Durante su uso, estas tienden a trabajar en situaciones donde tienen que aguantar procesos de carga y descargas agresivas, altas temperaturas, trabajar a altas tensiones, etc y esto provoca una serie de contaminantes a la atmósfera tales como:

- a. Contaminación atmosférica por la emisión de gases contaminantes (cantidad reducida).
- b. Posibles vertidos de ácidos, así como de sustancias altamente nocivas al medio, debido a la toxicidad de sus elementos (electrodos de plomo y óxido de plomo, y un electrolito de ácido sulfúrico diluido en agua).
- c. Pueden resultar peligrosos para la salud en el caso de fugas. El plomo es un elemento altamente tóxico para la salud humana.
- d. Contaminación del suelo marino.

E. Fin de la vida del producto

Una vez finalizada la vida de una batería, ya sea por fallo técnico o por antigüedad del producto, este tipo de baterías son 100% reciclables. Gracias a los avances sociales y tecnológicos, hoy en día es posible el reciclaje de este tipo de objetos, mediante la implantación de normativas y territoriales que permiten la gestión. [14][15][16]

A continuación, se muestra un diagrama ambiental de los distintos procesos de reciclaje que se llevan a cabo con este tipo de baterías.

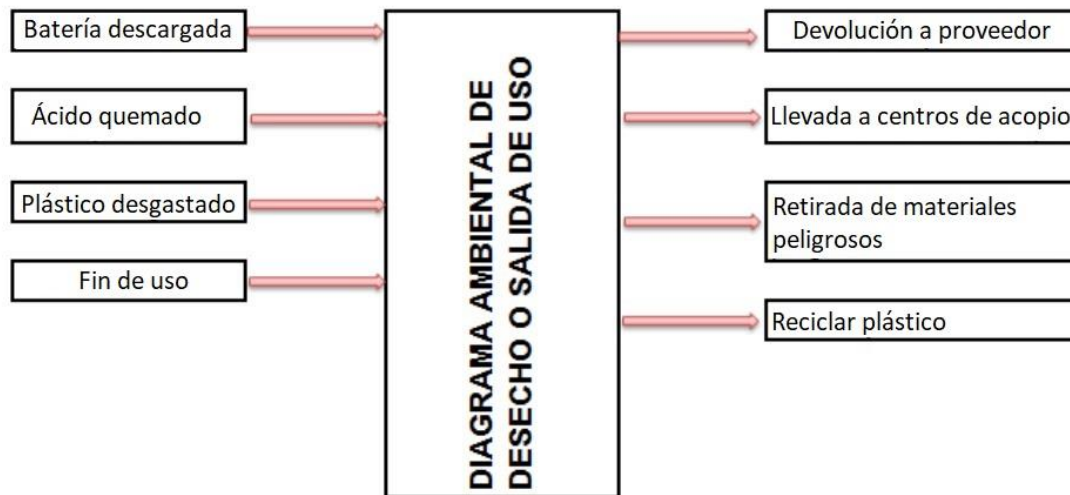


Figura 7. Diagrama ambiental del reciclaje de las baterías de Plomo-Ácido. **Fuente:** <http://repository.udistrital.edu.co>[15]

2.4 Impacto medioambiental en la fabricación de placas solares fotovoltaicas

Otra manera de generar energía eléctrica es a partir de la energía solar. Para su obtención utilizamos placas solares fotovoltaicas, capaces de transformar la radiación incidente en la superficie de la placa, en energía eléctrica en forma de corriente continua (CC). De esta manera, solo es necesario radiación solar, una instalación con un número determinado de paneles solares fotovoltaicos y el cableado necesario para el transporte de energía eléctrica.

La placa solar fotovoltaica

Una placa solar fotovoltaica está constituida por células solares que, a su vez, estas están compuestas principalmente de silicio. Este mineral se encuentra en abundancia en la naturaleza y se obtiene a partir de procesos de refinamiento de arena. De modo que la extracción de materia prima no supone ningún tipo de impacto negativo al medio ambiente ya que, a diferencia de los procesos de extracción de plomo, en el caso de las baterías, no es necesario la modificación o explotación de un ecosistema para su extracción. Por otra parte, la cantidad de silicio necesaria para la construcción de las células solares no es demasiado alta, por lo que las cantidades de silicio extraídas de la naturaleza no son demasiado grandes.

Una vez construida la placa solar, su mantenimiento es muy sencillo y no requiere de productos químicos para mantener un buen estado de la instalación. Por consiguiente, no se generan residuos sólidos o líquidos que resulten nocivos para la flora y la fauna del entorno.

La instalación solar es modular y versátil, dándole la capacidad de poder adaptarse a distintos escenarios. Este es un punto muy positivo ya que, gracias a su versatilidad, no se requiere la explotación de terreno irregular para allanarlo y así, poder colocar la instalación.

Debido a que este tipo de instalación resulta muy poco contaminante para el medio ambiente, contribuye al desarrollo sostenible de las nuevas tecnologías.

Por contraposición, las instalaciones solares son dependientes del sol, haciéndolas mucho menos productivas y eficientes en días donde las condiciones meteorológicas no permiten una buena captación de la radiación, o durante las horas de noche. [17]

La energía solar

La fuente de energía para la generación de energía eléctrica es el sol. Dicha fuente, es capaz de proporcionar energía de dos formas distintas: proporcionando calor y proporcionando luz.

Gracias a la radiación que captan las placas solares, estas son capaces de convertir la energía solar en energía eléctrica de una forma limpia y eficiente. Frente a la obtención de energía eléctrica mediante la quema de combustibles fósiles tales como el carbón o el petróleo, el uso de energía solar presenta una serie de beneficios para el medio ambiente tales como:

- Es una energía renovable. La energía solar pertenece al grupo de energías renovables, proporcionado por la naturaleza.
- Limpia. Para la obtención de esta energía no es necesario la quema de ningún tipo de combustible fósil, por lo que la emisión de CO₂ es nula, así como la generación de gases de efecto invernadero durante su obtención.
- Inagotable. A diferencia de los combustibles fósiles o el gas, la energía solar es un recurso prácticamente inagotable, que tenemos a nuestro alcance cada día desde la salida hasta la puesta de sol.
- No contaminante. Su utilización no altera ni destruye ningún ecosistema. Asimismo, no genera ningún tipo de residuo sólido o líquido que pueda resultar nocivo para la flora o la fauna.

Al alcance de todo el mundo. Este tipo de energía proviene del sol, por lo que se encuentra al alcance de todo el mundo. Por contraposición, la generación de energía a partir de la actividad humana requiere el desplazamiento y la instalación de infraestructuras en localizaciones lejanas de casa, debido a que la materia prima a extraer solo se encuentra bajo una serie de características.

Todos estos factores hacen que la energía solar sea de las energías más limpias y saludables para el planeta.



Figura 8. Fotomontaje del planeta con placas solares. **Fuente:** [www.conectatealsol.com/news\[18\]](http://www.conectatealsol.com/news[18])

2.5 Conclusiones

Una vez realizado el estudio del impacto medioambiental que supone la fabricación de las baterías, los paneles solares fotovoltaicos, así como el impacto medioambiental que supone la obtención y tratamiento de la energía eléctrica, se extraen las siguientes conclusiones:

- Es evidente que, tras los últimos acontecimientos celebrados en el tratado de París, donde las principales potencias mundiales se comprometían a disminuir sus emisiones de CO₂, así como los demás gases de efecto invernadero, ha habido cierta concienciación sobre el grave calentamiento global que está sufriendo el planeta, así como el devastador cambio climático que están sufriendo los habitantes que viven en él. Sin embargo, los últimos estudios climatológicos afirman que, pese a todas las reformas y modificaciones realizadas a lo largo de estos últimos años en el sector industrial, las emisiones de gases de efecto invernadero siguen aumentando, situándose dichos niveles, por encima del nivel necesario para poder evitar a tiempo el irreversible cambio climático.

- Haciendo una comparativa entre la energía eléctrica y la energía solar, se llega a la conclusión de que la energía solar resulta ser mucho más limpia y sostenible que la energía eléctrica. Esta última, aun siendo una de las principales energías renovables del planeta y una de las más limpias en su uso final y comercial, la actividad humana necesaria para la obtención de dicha energía supone un impacto medioambiental negativo.

Como se ha podido observar, el principal foco de contaminación reside en la quema de combustibles fósiles (carbón y petróleo) para la obtención de energía, necesaria para la obtención de energía eléctrica. Por contraposición, en la obtención de energía solar no interviene ningún factor contaminante, haciendo de esta energía mucho más sostenible que la anterior.

- Desde el punto de vista de la fabricación de los elementos vistos a lo largo del capítulo, se han obtenido conclusiones muy parecidas a las del punto anterior. Los procesos de extracción de las materias primas necesarias para la fabricación de paneles solares fotovoltaicos resultan ser mucho menos contaminantes que los procesos de extracción de las materias primas necesarias en la fabricación de baterías. Dicha afirmación se debe a que, en el caso de las baterías, las materias primas necesarias son difíciles de extraer y generan un grave impacto medioambiental. Sin embargo, para la fabricación de paneles solares, solo se requiere pocas cantidades de silicio puro, fácilmente extraíble de la naturaleza.

Capítulo 3. Motorización

3.1 Introducción

Debido a que el sistema de propulsión estudiado en el presente trabajo deja de lado una motorización basada en motores de combustión interna, evitando problemas tales como la emisión de gases contaminantes a la atmósfera o la contaminación de los océanos por el derramamiento de combustible, en el presente capítulo se estudiará y se analizará la motorización eléctrica. Un motor eléctrico es una máquina perteneciente a la familia de las máquinas eléctricas. En ella, podemos diferenciar tres tipos que, a continuación, se mostrarán de forma esquemática en un pequeño esquema.

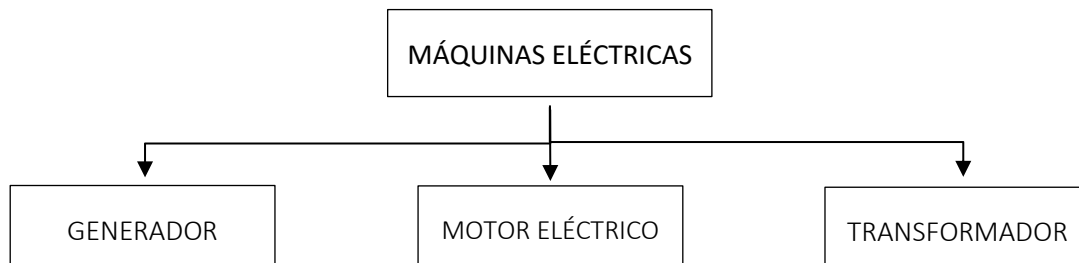


Figura 9. Esquema de las principales máquinas eléctricas. **Fuente:** Propia

La diferencia principal entre un generador y un motor eléctrico es que el primero, tiene como función fundamental la transformación de energía mecánica en energía eléctrica. Sin embargo, un motor eléctrico tiene como función principal, la transformación de energía eléctrica en energía mecánica. Por otro lado, un transformador es una máquina eléctrica que como su propio nombre indica, transforma la energía eléctrica de entrada en energía eléctrica con otras características y propiedades. Normalmente, la energía eléctrica de entrada suele ser de corriente alterna (CA). A diferencia de las máquinas eléctricas explicadas anteriormente, los transformadores se caracterizan por ser máquinas estacionarias, por el contrario, tanto los generadores como los motores eléctricos, son máquinas rotatorias que se rigen por el mismo principio físico. [19]

En el presente capítulo, se centrará en el estudio de los motores eléctricos ya que constituye un elemento fundamental en el sistema de propulsión de una embarcación. A lo largo de él, se analizará su funcionamiento, así como los principios básicos por los que se rigen. Se proseguirá con la clasificación de los tipos de motores eléctricos existentes hoy en día en el sector naval y, para concluir, se presentará una propuesta de mejora para el motor actualmente instalado en la embarcación panameña Sol de mi vida.

2.2.1 El motor eléctrico

El motor eléctrico, es una máquina eléctrica rotatoria cuya función principal es transformar energía eléctrica en energía mecánica. Para ello, los bornes del motor reciben una corriente eléctrica procedente de una fuente de alimentación (en el caso del presente trabajo, de un banco de baterías) que, al interaccionar con un campo magnético generado por el propio motor, induce una fuerza rotatoria llamada fuerza electromotriz (f.e.m). De esta manera, el motor consigue transformar la corriente eléctrica que circula por un conductor, en energía mecánica procedente de la interacción de esta corriente con el campo magnético generado por un imán.

Dicha energía, se transmite a la hélice del motor a través de un eje y, de esta manera, permite desplazar una embarcación a una velocidad determinada superando la resistencia al avance generado entre el casco de una embarcación y la superficie del agua. Actualmente existen distintas clases y tipos de motores eléctricos dependiendo de factores tales como la frecuencia a la que trabajan; la manera en que dichos motores están conmutados; la manera en que generan el campo magnético; su diseño, etc.

Dentro del sector naval, vemos como gradualmente el motor eléctrico va substituyendo al motor convencional de combustión interna, siendo los más utilizados los motores de corriente continua y los motores de corriente alterna asíncronos. Esto es debido a que el motor eléctrico presenta una serie de ventajas sobre el motor de combustión tales como:

- Navegabilidad silenciosa
- Cero emisiones contaminantes a la atmósfera
- Menos vibraciones
- Sin derramamientos de combustibles o malos olores
- Pesos reducidos
- Fácil instalación y fácil mantenimiento
- Mayor rendimiento

3.2 Conceptos básicos

Para poder clasificar de forma correcta los distintos tipos de motores eléctricos, primero se debe conocer el origen de procedencia de la corriente eléctrica suministrada. Dentro del campo de la electricidad, es importante conocer y saber diferenciar conceptos tales como la corriente continua, alterna, corriente trifásica, corriente monofásica, etc. Para ello, se define:

Electricidad. Fenómeno físico resultado del desplazamiento de un flujo constituido por partículas subatómicas cargadas eléctricamente. Dichas partículas reciben el nombre de electrones, y se caracteriza por ser la partícula elemental más ligera con la mínima carga eléctrica negativa que se encuentran alrededor del núcleo de los átomos. Dichos electrones, tienen la capacidad de saltar de la última capa del átomo perteneciente, uniéndose al átomo más cercano. Este proceso se repite a lo largo del conductor generando corriente eléctrica.

Corriente eléctrica. Es el resultado de la circulación de electrones a través de un conductor o circuito cerrado. Dependiendo de la dirección de la corriente eléctrica, diferenciamos dos tipos principales de corriente eléctrica. La corriente continua y la corriente alterna.

Corriente continua. Es un tipo de corriente eléctrica unidireccional, es decir, el flujo de electrones tiene siempre el mismo sentido de circulación constante en el tiempo, yendo del polo negativo al polo positivo de la fuerza electromotriz que la suministra. A su vez que el sentido de circulación, su polaridad no varía a lo largo del tiempo.

Corriente Alterna. A diferencia de la corriente continua (CC), la corriente alterna (CA) se caracteriza por ser bidireccional, es decir, el sentido de su circulación cambia periódicamente y a su vez, la polaridad. Su representación se caracteriza por ser una onda senoidal. Existen dos tipos de corrientes alternas, la corriente alterna monofásica y la corriente alterna trifásica.

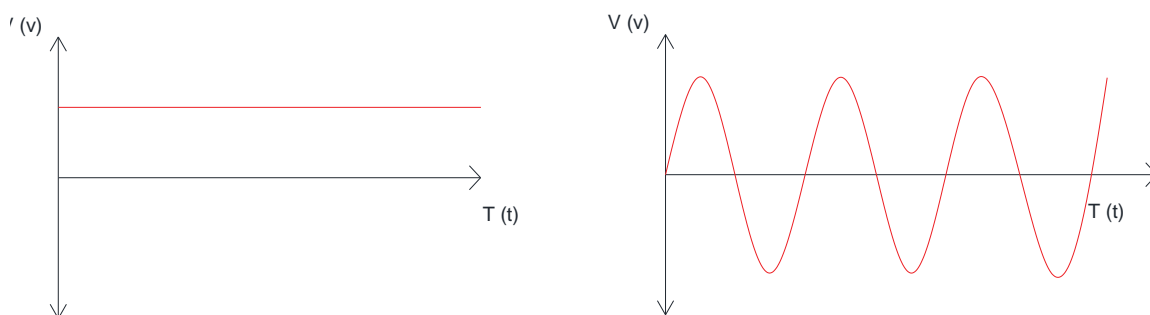


Figura 10. Gráfico (V-T) de corriente continua (izquierda) y gráfico (V-T) de corriente alterna. **Fuente:** Propia

Corriente Alterna monofásica. Tipo de corriente que se obtiene a partir de la obtención de la fase de la corriente trifásica y un cable neutro. Apropiado para la alimentación eléctrica en viviendas y electrodomésticos.

Corriente Alterna trifásica. Este tipo de corriente es la más utilizada en la industria naval ya que el transporte y distribución de electricidad es mejor que usando corriente alterna monofásica. Se caracteriza por ser un conjunto de tres corrientes alternas con las mismas magnitudes (frecuencia, amplitud y valor) con un desfase de 120° entre ellas.

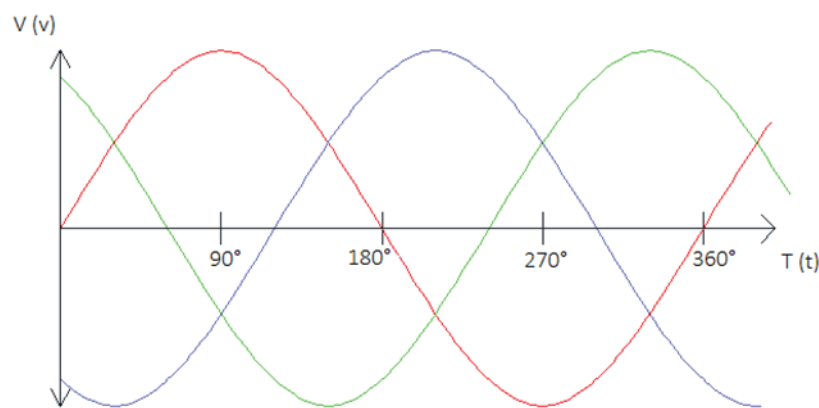


Figura 11. Gráfico (V-T) de una corriente alterna trifásica. **Fuente:** Propia

A lo largo del presente capítulo, se verá que, según la naturaleza de la corriente eléctrica suministrada, los motores se pueden clasificar en dos familias principales. Estos se clasifican en:

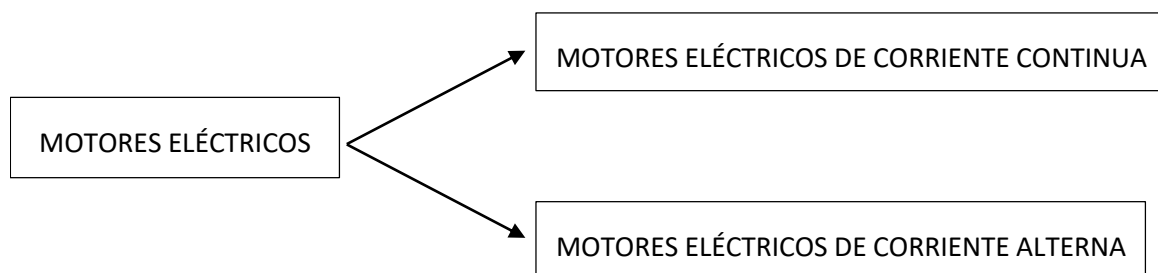


Figura 12. Clasificación de los tipos de motores eléctricos en función del origen de la corriente. **Fuente:** Propia

Una vez reconocidos los distintos tipos de alimentación eléctrica, se procede a estudiar los principios físicos en los que se basa el funcionamiento de un motor eléctrico. De esta manera, explicar su funcionamiento resultara más sencillo y claro.

3.3 Principios básicos de funcionamiento

Como hemos visto en el apartado 2.1, las máquinas eléctricas tienen la capacidad de convertir la energía mecánica en energía eléctrica en el caso de los generadores y de los transformadores, y la energía eléctrica en energía mecánica, en el caso de los motores eléctricos. Para ello, todas las máquinas nombradas anteriormente, aplican su funcionamiento a los principios físicos del magnetismo y electromagnetismo.

3.3.1 Campo magnético

Un imán es un material con la capacidad de atraer otros objetos de hierro y otros materiales con las mismas propiedades. Se caracteriza por tener en sus extremos un polo norte (N) y un polo sud (S) y que, por analogía, se asocia el polo norte (N) con carga positiva (+) y al polo sud (S) con carga negativa (-). Dichos polos, producen líneas de campo magnéticos en su exterior que salen por el polo positivo y vuelven a entrar por el negativo, haciendo un circuito cerrado. La zona del espacio donde se manifiesta este fenómeno físico recibe el nombre de campo magnético. [20][21]

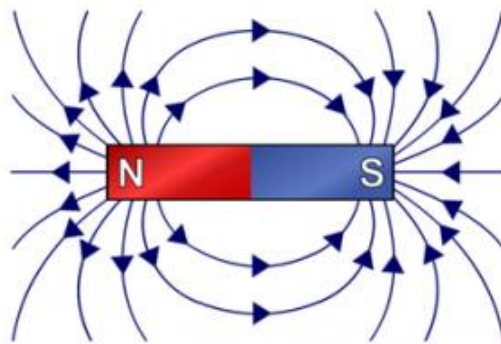


Figura 13. Líneas de campo magnético de un imán. **Fuente:** <http://www.quora.com>[22]

En la figura anterior, se puede ver reflejado las líneas magnéticas de un campo magnético generado por un imán, que nos permiten interpretar el vector de su intensidad. Dicha intensidad, se representa con el símbolo **B**, siendo el Tesla (T) su unidad en el Sistema Internacional (SI).

Desde un punto de vista eléctrico, en el año 1819, el físico danés Hans Christian Ørsted descubrió una pequeña relación entre el campo del magnetismo y el campo de la electricidad, donde postuló que una carga eléctrica en movimiento crea pequeños campos magnéticos.

Para ello, observó el movimiento de la aguja de una brújula al acercarla a un conductor excitado eléctricamente. Cuando no circulaba corriente por el conductor, la aguja señalaba al norte terrestre, mientras que si la acercaba cuando circulaba corriente, ésta señalaba en dirección perpendicular al conductor. [20][21]

A partir de ese experimento, se dedujo que toda carga eléctrica en movimiento genera un campo magnético. Por lo tanto, dicha carga recibe una fuerza F cuando se sitúa en un campo magnético externo B , debido a la interacción entre los dos campos, el creado por el magnético y el creado por la carga eléctrica. A partir de la *Ley de Lorentz*, se puede expresar la situación anterior con la siguiente expresión:

$$F = |Q| * v * B * \sin\alpha \quad (2)$$

Donde:

- B : Campo magnético con cierta intensidad.
- Q : Carga eléctrica con valor absoluto.
- v : Velocidad a la que va la carga eléctrica.
- α : Ángulo creado por los vectores v y B .

La distribución de la corriente eléctrica es un factor relevante en la creación del campo magnético, ya que este varía según la distribución de las cargas en movimiento. En el caso de los motores eléctricos, normalmente la espira conductora por donde circula la corriente tiene forma de bobina o solenoide. [20]

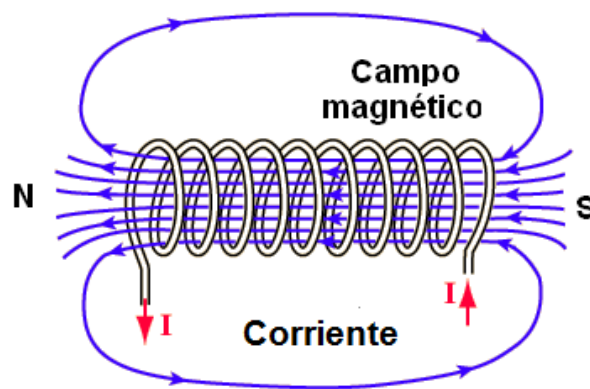


Figura 14. Representación de un electroimán. Fuente: <http://www.incb.com.mx>[23]

En la figura 14, se puede ver reflejadas las líneas de campo de un solenoide o bobina. El campo magnético generado en su interior dependerá del número de espiras que contenga dicha bobina teniendo en cuenta su longitud, representando el campo magnético B, de la siguiente manera:

$$B = \mu * n * I \quad (3)$$

Donde:

- μ : Permeabilidad del hierro.
- n: Densidad de espiras por longitud del cable.
- I: Intensidad.

Si en el interior de la bobina o solenoide se introduce un material ferromagnético el valor de B aumentará notablemente. Debido a que todas las líneas del campo pasan a través del material ferromagnético, la intensidad del campo B aumentará dando lugar a lo que se le conoce como electroimán.

Otra magnitud física a tener en cuenta para el funcionamiento de las máquinas eléctricas recibe el nombre de flujo magnético. Su unidad en SI es el weber (Wb), y define el flujo magnético a través de una superficie S. Su expresión es la siguiente: [20]

$$\Phi = \int B \cdot dS = \int B dS * \cos\varphi \quad (4)$$

Donde:

- φ : ángulo formado por los vectores B y S.
- B: Campo magnético.
- S: Superficie.

Posteriormente, a partir de los conceptos descritos anteriormente, el físico Michael Faraday estableció una relación matemática entre el flujo magnético y la fuerza electromotriz inducida (fem), conocida como *Ley de Faraday y Lenz*. Esta ley, fue uno de los descubrimientos más importantes del electromagnetismo y que, a partir de él, establece las bases de funcionamiento para numerosas aplicaciones, tales como las máquinas eléctricas. [20][21]

Ley de Faraday-Lenz

Se estableció en 1831 y sostiene que la variación de flujo magnético sobre una espira produce una fuerza electromotriz y un corriente inducido en sentido opuesto al flujo magnético.

Para su demostración, el físico inglés observó que el movimiento relativo entre un imán y un circuito generaba una corriente eléctrica. Dicha corriente es fruto de la variación del flujo magnético a través de la superficie de la espira del circuito, es decir, una fuerza electromotriz inducida que genera una corriente eléctrica inducida. A partir de una serie de experimentos, demostró que la fem inducida en un circuito cerrado es directamente proporcional a la variación del flujo magnético por unidad de tiempo que atraviesa la superficie del circuito. Se expresa de la siguiente manera:[20][21]

$$\xi = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (5)$$

A su vez, Faraday observó que, aumentando el número de espiras, también aumentaba la fem inducida. Se expresa de la forma siguiente:

$$\xi = N * \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (6)$$

Siendo N el número de espiras.

Una vez asumidos los conocimientos físicos necesarios para entender el funcionamiento de los distintos motores eléctricos, en el próximo apartado se procede a explicar dicho funcionamiento diferenciando las distintas partes de un motor eléctrico. [20]

3.4 Funcionamiento de un motor eléctrico

Todo motor eléctrico está compuesto por dos partes principales, una parte fija llamada estator y una parte móvil llamada rotor. Según el tipo de corriente suministrada por la fuente (CC o CA) estos componentes se comportarán de una manera u otra, por ese motivo, es necesario estudiar su funcionamiento por separado.

Motor de corriente continua (CC)

Como se lleva explicando a lo largo del presente capítulo, un motor eléctrico es una máquina eléctrica con la capacidad de convertir la energía eléctrica en energía mecánica rotatoria, es decir, a partir de una corriente eléctrica se consigue que un motor gire. En un motor de corriente continua (CC), dicha rotación es el resultado de la interacción existente entre el flujo magnético del inductor (estator) y las corrientes circulando por el inductor (rotor). El campo magnético del estator se genera al enfrentar dos imanes fijos por sus polos opuestos (N y S). Dichos polos o caras polares crean un campo magnético \mathbf{B} al hacer pasar una corriente eléctrica por el bobinado existente alrededor de las placas metálicas del estator llamado devanado de excitación. Este flujo magnético atraviesa el rotor.

A su vez, el campo magnético creado por el inducido se genera al hacer circular corriente eléctrica por el bobinado acoplado en los dientes del cuerpo cilíndrico del rotor. Teniendo en cuenta que el material que constituye el cuerpo del inducido es metálico, al hacer pasar corriente se convierte en un electroimán, generando polos o caras polares en sus bobinados.

Cuando el flujo magnético del inductor interactúa con las corrientes del inducido, se genera una fuerza \mathbf{F} que hace girar las espiras del rotor. Con esta rotación, los polos del rotor se alinean con los polos del estator (N y S). Una vez alcanzada dicha rotación, las escobillas cambian el sentido de la corriente eléctrica que circula por la bobina y, por consecuencia, también cambiará su polaridad. En ese momento, los polos magnéticos del estator y del rotor serán el mismo (N con N y S con S) provocando fuerzas de repulsión que harán que el rotor vuelva a girar para alinear sus polos de nuevo. De esta manera, se consigue obtener energía mecánica rotativa a partir de energía eléctrica. A continuación, se muestra una imagen donde se verá de forma más clara y visual el proceso explicado anteriormente. [19][21][24][25]

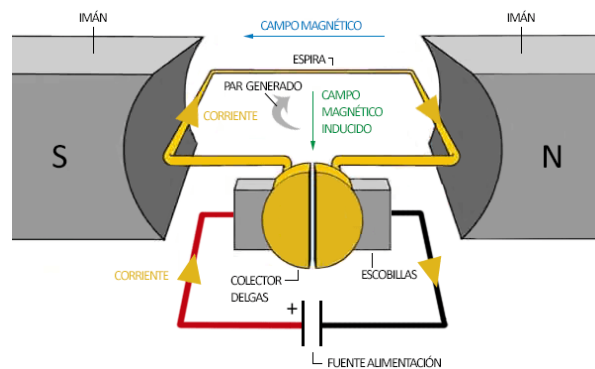


Figura 15. Funcionamiento de un motor de corriente continua (CC). **Fuente:** <http://luisllamas.es>[26]

- **Estator.** Parte fija del motor constituida por imanes permanentes que actúan como inductor. En su base lleva enrollado un bobinado de cobre que actúa como devanado de excitación cuando circula corriente eléctrica.
- **Rotor.** Parte móvil del motor también conocido como inducido. Está formado por láminas metálicas con ranuras en su superficie donde se disponen bobinas del devanado inducido.
- **Colector de delgas.** Elemento constituido por dos semi anillas cuya función principal es invertir el sentido de giro del eje del motor. De esta manera se consigue que el motor funcione de forma continua.
- **Escobillas.** Elementos de carbono que al experimentar rozamiento con las semi anillas del colector de delgas actúa como conexión eléctrica con los bornes de la caja del motor. [21][25]

Motor de corriente alterna (CA)

Existen varios tipos de motores de corriente alterna, diferenciándose entre ellos según la forma de generar el campo magnético del inductor con respecto a las corrientes del inducido. Bajo este criterio existen los motores síncronos y los motores asíncronos, tal y como se muestra en el siguiente esquema:

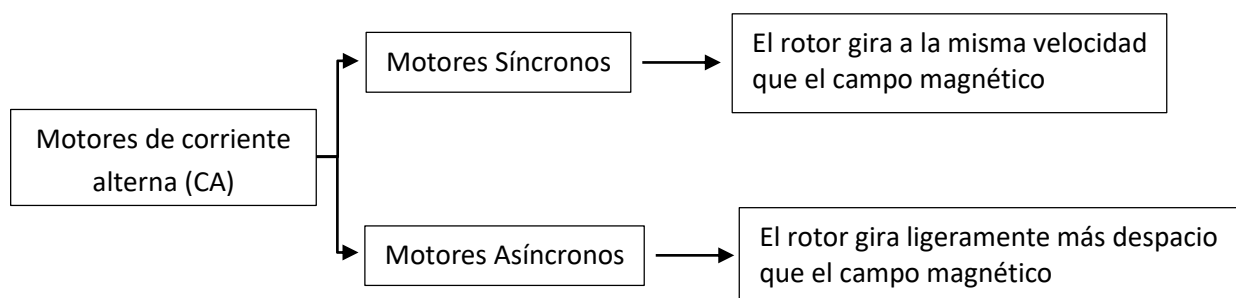


Figura 16. Clasificación de los motores de corriente alterna (CA). **Fuente:** Propia

Dicha velocidad de giro se conoce como velocidad de sincronismo (w_s). Se define de la siguiente manera:

$$w_s = 2 * \pi * f \quad (7)$$

Donde f es la frecuencia de la corriente trifásica.

Por lo tanto, la velocidad de sincronismo será la misma en los motores síncronos y ligeramente distinta a la velocidad de giro en los motores asíncronos. Esta pequeña diferencia se conoce como deslizamiento, s , y define la velocidad relativa entre el rotor y el campo magnético. Se define mediante la siguiente relación:

$$s = \frac{w_s - w}{w_s} = \frac{w_r}{w_s} \quad (8)$$

Donde:

- w : velocidad mecánica de giro del rotor.
- w_r : velocidad de pulsación de la corriente eléctrica del rotor.
- w_s : velocidad de sincronismo.

Los motores más utilizados en el sector naval, junto a los motores de corriente continua (CC), son los motores asíncronos también conocidos como motores de inducción. Estos últimos se caracterizan por su fácil construcción y por ser muy robusto. A su vez, son importantes debido a su fiabilidad tecnológica acompañado de un alto rendimiento de conversión electromagnética de alrededor el 90%. Todo esto a un precio mucho más bajo que en el caso de los motores síncronos.

Por contraposición, estos últimos se caracterizan por su fácil control de la velocidad gracias al sincronismo que presentan los componentes del motor que, en el caso de los motores asíncronos, son muy difíciles de encontrar. [19][21][24][25]

Motor asíncrono

El motor asíncrono es el tipo de motor de corriente alterna más utilizado en la industria naval, debido a sus altas potencias, a diferencia del motor síncrono. Está constituido por un estator formado por tres bobinados desfasados por un ángulo de 120°. En su interior se dispone el rotor (bobinado o en jaula de ardilla) acoplado a un eje giratorio que se conecta al circuito exterior por el colector de delgas de sus extremos. Un rotor devanado está formado por tres devanados trifásicos que normalmente se disponen alineados con los devanados del estator, por otro lado, un rotor de jaula de ardilla no dispone de ellos, substituyéndolos por barras de latón, cobre o aluminio. Ambos tipos de rotor se encuentran en corto circuito.

El suministro de una corriente trifásica en los devanados del estator, provocan un campo magnético cuya frecuencia es la misma que la que lleva la corriente alterna. Dicho flujo, induce corrientes en un rotor que se encuentra en corto circuito lo que provocará nuevas corrientes en el rotor que interactuarán con el campo magnético generado inicialmente por los bobinados del estator. Según la ley de Faraday, la fem (fuerza electromotriz) inducida en las espiras del rotor provocadas por la interacción del flujo magnético con las corrientes del rotor, es directamente proporcional al flujo magnético del estator, por lo que el campo del rotor seguirá siempre al campo del estator. Si se alcanza la velocidad de sincronismo, no habrá variación de flujo por lo que no se inducirían las corrientes por el rotor, necesarias para el movimiento rotativo del motor. En conclusión, el motor se pararía. Para evitarlo, la velocidad de giro será ligeramente inferior a la velocidad de sincronismo, pero nunca habrá estabilidad.

El tipo de motor asíncrono más utilizado en el sector naval es el de jaula de ardilla. Los rotores bobinados tienen la ventaja de poder ser manipulados con facilidad para controlar mejor la velocidad del motor, sin embargo, un motor con rotor de jaula de ardilla se caracteriza por soportar grandes sobrecargas sin variar su alto rendimiento, un mantenimiento poco costoso y un peso muy bajo, destacando entre los otros tipos de motores de corriente alterna, así como el motor de corriente continua. [19][21][24][25]

Motor síncrono

Se llaman así porque la velocidad de giro del rotor la misma que la velocidad del campo magnético generado del estator. De esta manera se obtiene la velocidad de sincronismo, un estado de estabilidad que permite poder controlar la velocidad del motor con facilidad.

El motor síncrono está formado de la misma manera que los motores comentados anteriormente; una parte fija llamada estator constituida por tres devanados trifásicos y una parte móvil llamada rotor. A diferencia del motor asíncrono, el rotor del presente motor se comporta igual que el rotor de corriente continua (CC), es decir, como un imán o electroimán para los grandes motores. La fuerza inducida es el resultado de la interacción del campo magnético generado por los devanados del estator al suministrar en sus bobinados una corriente trifásica, y el campo magnético generado por la corriente continua que circula por el bobinado del rotor, que, al ser metálico, todas las líneas de campo atraviesan su cuerpo (de N a S) convirtiéndolo en un electroimán. Existen dos tipos de rotor en función de la finalidad del motor; rotor cilíndrico utilizado para motores sometidos a altas velocidades donde las fuerzas de contrapar son bajas, y el rotor de polos salientes, utilizado normalmente en máquinas cuya velocidad de giro es pequeña. [19][21][24][25]

3.5 Tipos de arranque de un motor alterno

En el presente apartado se procede a analizar los distintos tipos o métodos de arranque que se pueden configurar en un motor alterno. Este factor es de suma importancia dentro de las características de una máquina eléctrica, y se aplicará una configuración u otra teniendo en cuenta los siguientes factores:

1. Garantizar de manera segura y controlada un par de arranque superior al de la carga. De esta manera se consigue alcanzar la velocidad nominal, una vez superado el par resistente del motor.
2. No causar daños graves en el motor durante el arranque de éste. Una mala configuración del conexionado de los bornes puede llegar a provocar grandes sobreesfuerzos a los devanados del circuito. Por ello, es importante analizar las características del tipo de motor queremos aplicar el arranque.

Es necesario conocer los tipos de conexiones que puede presentar los bornes de la caja de bornes en un motor eléctrico. Hay principalmente dos tipos de conexiones; conexión en estrella y conexión en triángulo.

La conexión en estrella se caracteriza por hacer trabajar al motor en unas condiciones donde la intensidad que recorre las fases del bobinado es la misma intensidad que la de línea, por lo que $I_l = I_f$. En cuanto a la tensión que se subministra, es $\sqrt{3}$ más pequeña que la tensión de línea o de red. De esta manera tenemos que $V_f = \frac{V_l}{\sqrt{3}}$. [21][24]

En la siguiente imagen se puede observar el esquema correspondiente a una conexión en estrella:

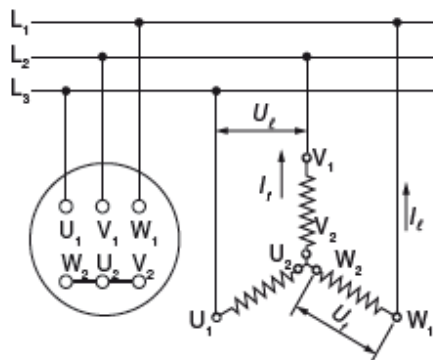


Figura 17. Conexión trifásica en estrella de los bobinados de un motor. **Fuente:** <http://www.nheducation.es>[24]

En cuanto a una conexión en triángulo, ocurre lo opuesto a la conexión explicada anteriormente. Ésta se caracteriza por la intensidad que circula por las fases del bobinado es $\sqrt{3}$ mayor que la intensidad de línea y, sin embargo, trabajan con el mismo valor de tensión. En este caso, $V_l = V_f$. [21][24]

En la siguiente imagen se puede observar el esquema correspondiente a una conexión en triángulo:

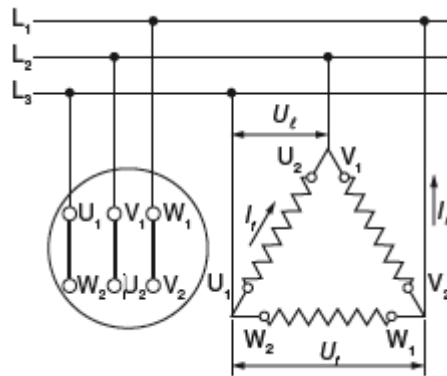


Figura 18. Conexión trifásica en triángulo de los bobinados de un motor. **Fuente:** <http://www.nheducation.es>[24]

Todo motor que presente un bobinado trifásico tiene la capacidad de conectarse tanto en estrella como en triángulo.

Una vez explicado los distintos tipos de conexiones que pueden presentar los bornes de un motor, se procede a clasificar los distintos métodos de arranque para un motor alterno. [19][21]

Los distintos métodos de arranque son:

A. Arranque directo o en cortocircuito

Este tipo de arranque es el más sencillo de realizar, los distintos métodos presentes. Suele utilizarse en cualquier motor siempre y cuando sus características técnicas lo permitan, ya que durante el arranque presentan picos agresivos de corriente, con una intensidad entre 5 y 8 veces mayor que la intensidad de línea. Dicha intensidad se calcula mediante la siguiente ecuación

$$i = \sqrt{2} * i_a * k_m \quad (9)$$

Donde:

- i_a es el pico de intensidad.
- k_m factor que varía en función de las dimensiones del motor, siendo 1,8 para motores pequeños y 2 para motores grandes.

B. Arranque estrella-triángulo

Este tipo de arranque es aplicable a los motores alternos con la capacidad de funcionar con un conexionado en triángulo trabajando a tensión de red. Se caracteriza por presentar una funcionalidad que busca la reducción de consumo eléctrico durante el arranque del motor.

Durante el arranque, se disponen los bornes con una conexión en estrella y mediante el uso de un conmutador manual, se cambia a un conexionado en triángulo durante el funcionamiento del motor.

A raíz de esta configuración, la tensión a la cual trabaja el motor durante el arranque será $\sqrt{3}$ menor que el valor de tensión de línea. Una vez se haya alcanzado valores nominales de funcionamiento, pasa a trabajar con tensión de línea.

C. Arranque mediante autotransformador

Este tipo de arranque se realiza acoplando un autotransformador entre el motor y la red de alimentación. Su función principal es conectar mediante sus bornes el circuito eléctrico del motor con el circuito de la red. Este tipo de arranque se utiliza para motores con una potencia muy alta, por lo que trabajan a tensiones mucho mayores que las tensiones de red. Durante el arranque del motor, el

autotransformador suministra una tensión baja hasta que se alcanza la velocidad nominal. Una vez alcanzada, el autotransformador deja de funcionar, permitiendo que el motor y la red trabajen a la misma tensión.

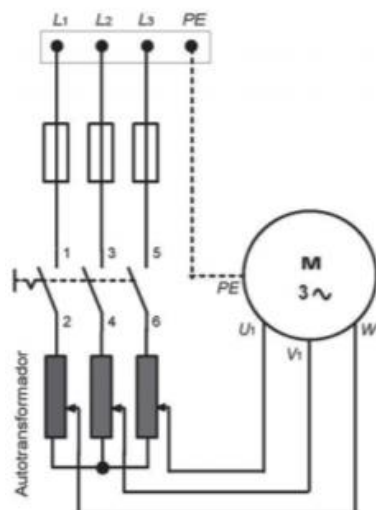


Figura 19. Arranque mediante un autotransformador. **Fuente:** Maquinas eléctricas ETSEIB[25]

D. Arranque mediante el control de los parámetros del rotor.

Este tipo de arranque es aplicable a motores de colector, es decir, motores que presentan cierta accesibilidad a los devanados de su parte giratoria o rotor, permitiendo su manipulación durante el momento de arranque.

Dicha manipulación consiste en el uso de resistencias para modificar el par de arranque del motor y conseguir unos valores de velocidad y potencia específicos. Normalmente, se buscan velocidades bajas con poco consumo de potencia.

3.6 Tipología de motores eléctricos

Según la procedencia de la corriente suministrada, en el apartado 2.2.1 se ha visto que existen motores alimentados con corriente continua y motores alimentados con corriente alterna. A su vez, estos dos tipos de motores se dividen en distintas clases. Para verlo de forma más clara, se disponen de los siguientes esquemas con los distintos motores eléctricos existentes hoy en día, y de esta manera, tener una idea más generalizada. [21][24]

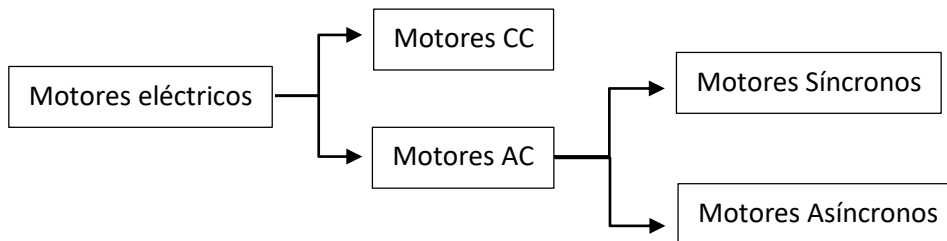


Figura 20. Clasificación de los motores de corriente alterna en función de la velocidad de giro del motor y la velocidad de sincronismo. **Fuente:** Propia

Teniendo en cuenta el comportamiento de la velocidad de giro del motor y la velocidad de sincronismo, podemos subdividir los motores AC en motores síncronos y motores asíncronos. En función de la constitución del rotor del motor, el motor síncrono se puede subdividir en motores con rotor cilíndrico y motores de polos salientes.

A continuación, se muestra un esquema donde se aprecia dicha división:

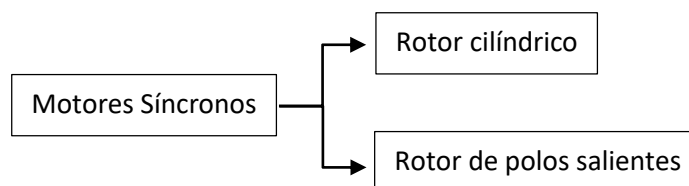


Figura 21. Clasificación de los motores síncronos. **Fuente:** Propia

En cuanto a los motores asíncronos, se pueden clasificar dependiendo del tipo de corriente que se le suministra. De esta manera, encontramos motores monofásicos (alimentados por red monofásica) y los motores trifásicos (alimentados por red trifásica).

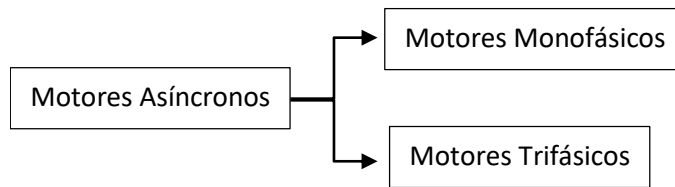


Figura 22. Clasificación de los motores asíncronos. **Fuente:** Propia

A su vez, tanto los motores monofásicos como los motores trifásicos pueden subdividirse tal y como se muestra en los siguientes esquemas:

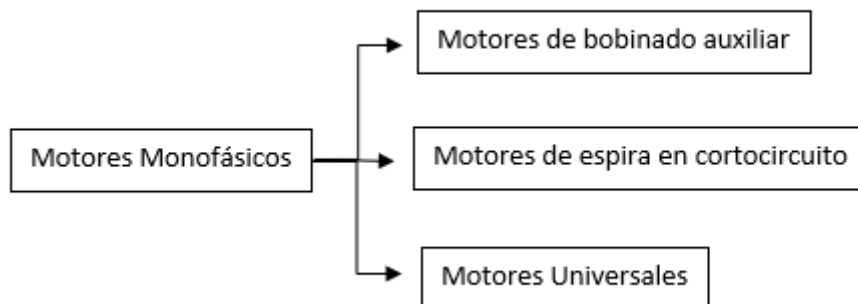


Figura 23. Clasificación de los motores asíncronos alimentados con corriente monofásica. **Fuente:** Propia

- Motores de bobinado auxiliar. Un motor monofásico no tiene la fuerza necesaria para arrancar por si solo. Para ello, se dispone de un bobinado auxiliar situado en el estator que funciona durante el arranque. Una vez el motor funcione a parámetros nominales, el bobinado auxiliar se desconecta permitiendo que el motor funcione con normalidad.
- Motor de espira en cortocircuito. Este tipo de motor se caracteriza por presentar una parte fija o estator de polos salientes y una parte móvil o rotor en forma de jaula de ardilla. Con estas características, el motor presenta un rendimiento bajo, por lo que no se suele utilizar en el sector naval.
- Motor universal. Este tipo de motor tiene la capacidad de trabajar tanto en corriente continua (CC) como en corriente alterna (CA). Se debe prestar atención durante el arranque en CC, ya que

presenta un par de arranque muy elevado. Sin embargo, el arranque en CA no suele utilizarse tanto debido a su bajo rendimiento.

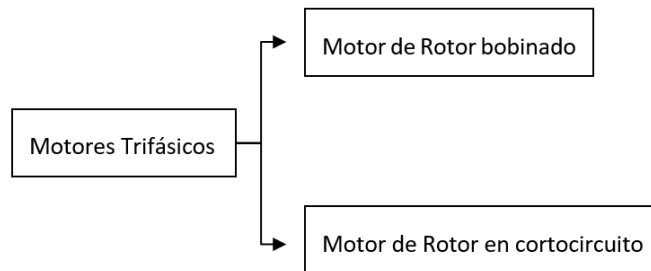


Figura 24. Clasificación de los motores asíncronos alimentados con corriente trifásica. **Fuente:** Propia

- Rotor bobinado. El rotor de este tipo de motor dispone de un devanado trifásico parecido al devanado del estator. Su arranque permite un par 2.5 veces mayor al par nominal. Sin embargo, el uso de estos motores es pequeño debido a que requieren un mantenimiento muy específico y complicado.
- Rotor en cortocircuito. Es el tipo de motor con el funcionamiento más seguro de todos los explicados anteriormente, lo que lo hace ser uno de los más utilizados. A su vez, su construcción es muy simple por lo que su mantenimiento resulta muy fácil de realizar. Su arranque es muy simple y se realiza mediante un interruptor tripolar. Como inconveniente, cabe resaltar que, durante el arranque, este tipo de motor absorbe mucha intensidad.

3.7 Comparativa

En el presente apartado realizará una comparativa entre los principales fabricantes de motores eléctricos destinados a embarcaciones de recreo. Después de analizar el mercado actual, se ha llegado a la conclusión que el número de empresas destinada a esta parte del sector náutico es reducido, ya que, a diferencia de los motores de combustión interna, este tipo de motor está aún en fase de estudio y desarrollo. Por ende, grandes empresas del mundo de la náutica como Yanmar, Yamaha, Volvo Penta o Mitsubishi, empiezan a presentar en ferias y exposiciones, prototipos de sus nuevos motores eléctricos.

Los principales fabricantes que se tienen en cuenta para la posible propuesta de mejora son los siguientes:

- Torqeedo.
- Aquawatt.
- Elco.
- E-Propulsion.

Para la realización de la comparativa mostrada a continuación, se tendrán en cuenta factores tales como: Potencia de propulsión.

- Eficiencia.
- Peso.
- Coste económico.
- Red de distribución del fabricante.

Debido a que la gama de productos de E-Propulsion oscilan entre 1 CV y 6 CV, no se contemplará en la presente comparativa debido a que sus motores no ofrecen la potencia necesaria para cubrir las necesidades de la embarcación panameña. [27]

A continuación, se muestra una tabla comparativa de los motores eléctricos de cada fabricante elegidos como posible propuesta de mejora. Para ello, se ha optado por la elección de motores con una potencia similar a la del motor actualmente instalado. El objetivo de la presente comparativa es encontrar el modelo que ofrezca una situación en la que los factores mencionados anteriormente sean mejores.

De la empresa alemana Torqeedo, se decide elegir el motor eléctrico ya instalado en la presente embarcación, un motor eléctrico fueraborda de 20 kW de consumo con una capacidad del 56%, ofreciendo una potencia de propulsión de 5,6 kW. No se contempla motores de mayor potencia ya que, aun sabiendo que el aumento de potencia supondría una mayor velocidad, el coste unitario aumentaría considerablemente. Por otro lado, el modelo Cruise 10.0 es el modelo con mayor potencia, al que se le puede configurar un banco de baterías de distinto fabricante. Motores Torqeedo más grandes que el Cruise requieren bancos de baterías Torqeedo y eso reduce a 0 las posibilidades de optar por una configuración basada en el precio y el peso, con productos de otros fabricantes. [5]

El fabricante austriaco Aquawatt, presenta una gama de motores fueraborda parecidos a la que ofrece el fabricante alemán. El rango de potencias que ofrece oscila desde 4 kW hasta 50 kW, destinados a cubrir las necesidades tanto de una embarcación de recreo de poco desplazamiento como motores que requieren una gran potencia de propulsión como en el caso de embarcaciones pesqueras. [28]

Para la presente comparativa se ha elegido el motor Green Power, un motor eléctrico que presenta un consumo de 15,5 kW con un rendimiento del 54%, ofreciendo una potencia de propulsión de 9,504 kW. Cuenta con un peso inferior que el motor anterior, pasando de 61,3 kg a 52 kg, sin embargo, el precio unitario es superior al Torqeedo, llegando a los 9.864,00 € por unidad. [28]

Por último, el motor escogido de la marca estadounidense Elco, hace referencia al motor EP-30, con un consumo de 15,84 kW y una eficiencia del 60%, ofrece a la embarcación una potencia de propulsión de 9,504 kW. Presenta unas características técnicas en las que destaca por su peso reducido de 38,56 kg y, a diferencia de los motores mencionados anteriormente, su situación geográfica favorece el servicio post-venta, disminuyendo considerablemente el tiempo de espera de posibles recambios o servicio técnico². [29]

² El propietario de la embarcación manifiesta ciertas quejas hacía el fabricante Torqeedo debido a las largas esperas para obtener recambios o nuevas compras. Con el nuevo fabricante propuesto en la presente comparativa, se estima que el tiempo de espera disminuirá considerablemente

A continuación, se muestra una tabla comparativa de los motores eléctricos descritos anteriormente:




| Motor | Torqueedo [5] | AquaWatt [28] | Elco [29] |
|------------------------|---|--|---|
| Modelo | Cruise 10.0 RL | Green Power | EP-30 |
| Consumo | 10 kW | 15,5 kW | 15,84 kW |
| Tensión Nominal | 48 V | 48 V | 96 V |
| Potencia de propulsión | 5,6 kW | 8,68 kW | 9,504 kW |
| Eficiencia | 56% | 52% | 60% |
| Peso | 61,3 kg | 52 kg | 38,56 kg |
| € Ud | 8.999,00 € | 9.864,00 € | 6.397,02 € |
| Imagen |  |  |  |

Tabla 5. Comparativa técnica entre motor Cruise 10.0 RL, Green Power y EP-30. **Fuente:** Propia

Según la información facilitada en la tabla 5, se puede llegar a la conclusión que, de los distintos modelos comparados en el presente apartado, el más apropiado para substituir el motor actualmente instalado a bordo de la embarcación panameña es el motor estadounidense EP-30, un fueraborda eléctrico Elco con una potencia de propulsión de 9,504 kW. Sin embargo, si el usuario no opta por la opción estadounidense, se le recomienda mantener el motor Torqueedo que tiene actualmente instalado, ya que comparándolo con el motor austriaco Aquawatt, se obtendrían unos resultados muy parecidos con un incremento considerable de precio

Para concluir, se puede decir que con la nueva propuesta de mejor se consigue alcanzar el objetivo de proponer un nuevo modelo que proporcione a la embarcación una disminución de peso, un aumento de potencia de propulsión, un ahorro considerable de dinero y un producto cuyo fabricante se encuentre más cerca que el fabricante alemán Torqueedo.

3.8 Propuesta de mejora

Teniendo en cuenta las conclusiones obtenidas en la comparativa de los principales fabricantes de motores eléctricos destinados a embarcaciones de recreo y desplazamiento, en el presente trabajo se propone como propuesta de mejora, el modelo EP-30 de la marca estadounidense Elco

Con la presente propuesta, se ha podido observar en la tabla 5 mejoras relacionadas con el peso del motor y por consecuencia, el peso final de la embarcación, el precio unitario del motor y un incremento en la potencia de propulsión proporcionada por el motor. Para la determinación de dicha conclusión, se ha tenido en cuenta las marcas de motores eléctricos existentes en el mercado náutico actual, y se ha hecho una breve comparación con los motores eléctricos fueraborda Green Power de la empresa Aquawatt y el actual motor Torqeedo Cruise 10.0 RL.

Teniendo en cuenta que la embarcación del presente estudio se encuentra en Panamá, la distribución de recambios, así como de motores, kits y baterías, es mucho más cómodo y sencillo con la empresa estadounidense, ya que presenta una red de distribución que abarca a gran parte del mundo, incluyendo centro y sud américa.

No obstante, el consumo del motor es un factor muy importante en la presente embarcación, ya que busca un funcionamiento autosuficiente a partir de la energía eléctrica que le proporciona el techo solar y las baterías. En este aspecto, el consumo del motor Elco es superior al consumo de los otros motores, por lo que se deberá tener en cuenta en el cálculo de autonomía de las baterías en el próximo capítulo.

Como conclusión, y teniendo en cuenta todos los aspectos comentados anteriormente, se recomienda la substitución del motor Torqeedo por el motor Elco.

Capítulo 4. Las baterías

4.1 Introducción

Dentro de la familia de los acumuladores de energía, el método más empleado a la hora de almacenar energía, tanto para la alimentación de los motores como para la alimentación de los instrumentos de navegación, es mediante el uso de baterías, en este caso, de baterías marinas.

En el presente capítulo, se estudiarán y se analizarán las principales baterías empleadas en el sector náutico. El objetivo de este estudio es la familiarización de las baterías, así como su composición, el rendimiento que ofrecen y su aplicación. Una vez estudiadas, se realizará el cálculo de potencia y dimensionado del banco baterías para determinar cuál será la instalación necesaria para impulsar la embarcación, y cuál es la mejor manera de distribuirla. Una vez llegadas a unas conclusiones, se propondrá un proveedor que ofrezca una gama de productos apto para realizar una buena selección.

4.2 Las baterías

Las baterías son un sistema electroquímico que, mediante una serie de procesos químicos, tienen la capacidad de almacenar y/o liberar energía eléctrica.

La unidad más básica de una batería, se le conoce como celda. En ella se llevan a cabo las reacciones químicas necesarias para la acumulación de energía eléctrica. El conjunto de estas celdas (2 o más celdas) recibe el nombre de batería.

A su vez, una celda es un sistema constituido por tres componentes. Por un lado, hay los electrodos, que con polaridad opuesta reciben el nombre de cátodo (+) y ánodo (-).

(-) Ánodo → Oxidación

(+) Cátodo → Reducción

Estos dos componentes, están conectados por un electrolito que es el responsable de las reacciones necesarias para el almacenamiento y/o liberación de electricidad. Para separar estos dos componentes se utilizan los separadores. [4][30]

4.2.1 Principios básicos

El principio fundamental por el que se rige el funcionamiento de las baterías se encuentra en las reacciones redox (reducción-oxidación). Dichas reacciones se conocen como un proceso reversible de transferencia de electrones por medio de una disolución acuosa llamada electrolito.

En sistema redox, los electrodos son semirreacciones químicas que forman parte de la reacción global. Uno de los electrodos libera electrones al medio iónico obteniendo un estado de oxidación por la pérdida de e^- y, por contraposición, el otro electrodo los capta adoptando un estado de reducción. Para que tenga lugar este tipo de reacción, es necesario que las dos semirreacciones se produzcan a la vez, ya que una sin la otra no podría existir un sistema redox. Los electrones que el componente oxidante recibe del medio son procedentes del componente reductor. Provocando las circunstancias adecuadas, ya que se trata de un proceso reversible, podemos provocar tanto la carga como la descarga de una batería. [4][30]

4.2.2 Parámetros principales

Antes de proceder al estudio de los distintos tipos de baterías existentes en el sector náutico, es necesario definir los principales conceptos de las baterías, con el objetivo de entender con más facilidad las futuras tablas y figuras que se mostrarán en los siguientes subapartados.

Uno de los componentes más importantes a tener en cuenta dentro de las características de las baterías, es su capacidad de almacenamiento, así como su tensión de salida o su alta energía específica.

Algunos de los principales parámetros a tener en cuenta son:

- **Capacidad.** Se entiende como capacidad (C), a la cantidad de cargas eléctricas que puede llegar a suministrar en una hora. Por lo tanto, este cálculo se mide en amperios (A) x hora, siendo uno de los cálculos más importantes y más característico de una batería. Esta capacidad varía dependiendo de distintos factores, tales como la tecnología de fabricación, el número de cargas y descargas o la dependencia de la tensión en relación con la temperatura de funcionamiento. Siendo I el corriente eléctrico definido como el coeficiente entre las cargas eléctricas Q en un intervalo de tiempo T. Al aislar la Q, la nombramos C (Capacidad). [4]

$$C = I \times T \quad (10)$$

- **Estado de carga.** Midiéndose en %, indica el porcentaje de carga en la batería. El estado de carga de una batería suele operar en un intervalo de 0 a 100, estando completamente descargada en 0 y al 100% cuando está completamente cargada. No obstante, no se recomienda cargar la batería en su totalidad de capacidad debido a la creación de mini ciclos provocando daños en las celdas y por consiguiente,

una disminución de su vida útil. Por contraposición, tampoco se recomienda permitir que la batería se descargue hasta llegar a un 20 % de su capacidad.[31]

- **Vida de la batería.** Se entiende como vida útil, al intervalo de tiempo en el que la batería resulte ser operativa, dentro de los márgenes de respuesta óptimas. Este parámetro varía según varios factores. Por un lado, la vida útil de la batería variará según el uso que se le dé, es decir, el número de cargas y descargas, número de ciclos, etc. Por otro lado, dependerá también de la composición química de la batería y de las prestaciones que del producto global.
- **Tensión de circuito abierto.** Dentro de la placa de una batería, la tensión de circuito abierto hace referencia al voltaje máximo que puede aportar una batería. Debido a que todas las baterías cuentan con una resistencia R interna, este parámetro variará en función del tiempo de uso. Por lo tanto, tenemos que:

$$V_{CARGA} = V_{OC} + I \times R_{INTERNA} \quad (11)$$

- **Corriente de descarga máxima.** Hace referencia a la intensidad que tiene una batería en descargarse. Este parámetro va en función de la capacidad de dicha batería. Si aumenta la corriente de descarga, disminuye su capacidad, por lo que, si tenemos una batería con una capacidad alta, su corriente de descarga máxima será pequeña.
- **Profundidad de descarga.** Como parámetro orientativo y por seguridad, nos recomienda el porcentaje de descarga al que podemos llegar a tener en una batería. No se recomienda tenerlo inferior al 20% de capacidad, ya que conlleva efectos negativos. Una batería con menos capacidad que ese porcentaje, conlleva efectos negativos debido a que para volverla a cargar serán necesarios más ciclos, y esto hará disminuir la vida útil de la batería. [31]

4.3 Tipología de baterías

Como hemos visto en el apartado 2.2.2, para el almacenamiento de energía en forma de electricidad, las baterías utilizan electrodos para realizar las reacciones químicas necesarias. Son los componentes químicos de sus electrodos que dan nombre a los distintos tipos de baterías. En la industria náutica, las tres baterías más utilizadas son las de Ion-Litio, Plomo-Ácido y Sodio-Sulfuro con sus numerosas variaciones según sus compuestos químicos. En el presente subapartado se estudiarán más detenidamente estos tres tipos de baterías.

En el presente trabajo, se hablará de dos tipos de baterías, en función de la finalidad que se le dará. Por un lado, se utilizará un pack de baterías necesarias para la puesta en marcha y funcionamiento del motor, y, por otro lado, se utilizarán las llamadas baterías solares, encargadas de almacenar la electricidad procedente de los paneles fotovoltaicos instalados en el techo solar de la embarcación. Mediante este segundo pack de baterías, se alimentarán los distintos instrumentos de navegación instalados a bordo.

Antes de proseguir con la clasificación de las principales baterías, es necesario hacer una aclaración más específica de la clase de baterías que se está hablando en este capítulo y que se utilizan en la embarcación de estudio.

Según la capacidad de devolver la energía eléctrica (apartado 2.1), las podemos clasificar por baterías primarias y baterías secundarias. Las primarias, hacen referencia a aquellas que, una vez cargadas en su máxima capacidad, solo pueden descargarse una única vez a lo largo de su vida útil. Por contraposición, las baterías secundarias son aquellas que permiten ser cargadas y descargadas varias veces a lo largo de su vida.

- Ejemplo de batería primaria: Una pila
- Ejemplo de batería secundaria: Baterías marinas

En el sector de la náutica, debido a su mayor extensión de aplicación se utilizan las baterías secundarias.

A continuación, se expondrá una clasificación de las principales baterías más utilizadas para la alimentación del motor eléctrico. La e-boat panameña, consta de un motor eléctrico fueraborda con un consumo de 10 kW.

4.3.1 Baterías de Ion-Litio

Este tipo de batería es conocida por tener grandes prestaciones gracias a la ligereza del material químico principal, el litio. A parte de ser ligero, se caracteriza por tener un gran potencial electroquímico con la capacidad de acumular grandes cantidades de energía. Es por eso por lo que las baterías Ion-Litio poseen una densidad de energía que ronda entre los 300 y los 400 kWh/m³ y un rendimiento aproximado al 94%.

Lo que más gusta al consumidor es su largo ciclo de vida (4.500 ciclos) así como su baja autodescarga. A diferencia de las demás baterías, son las menos contaminantes ya que en su composición no existen elementos químicos tales como plomo, cadmio o mercurio. [32]

A continuación, se muestra una gráfica donde se ve la curva de descarga de una batería Ion-Litio.

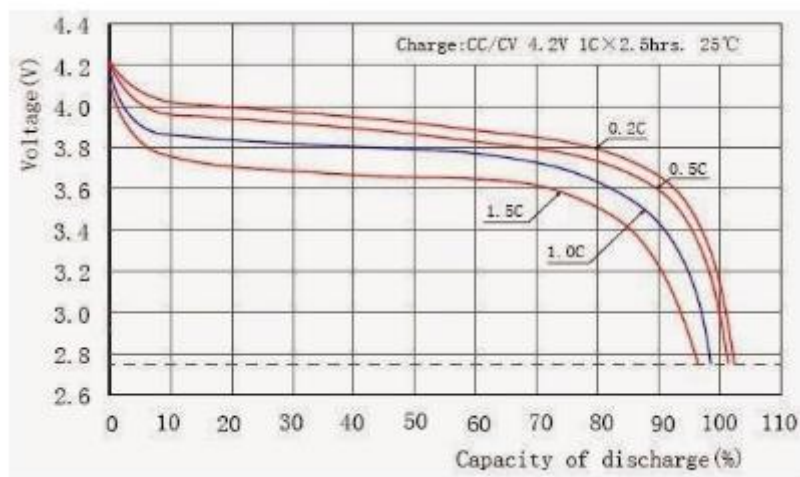


Figura 25. Curva de descarga de una batería de Ion-Litio. Fuente: <http://colmenarezjl.blogspot.com>[33]

Composición química de sus componentes:

- Cátodo (+): Óxido metálico de Litio y sus variaciones; Li_xCoO_2 , LiMnO_4 , LiNiO_2
- Ánodo (-): Material de carbono; Li_xC_6
- Electrolito: Sal de litio. Pudiendo ser las concentraciones de Li: LiPF_6 y LiAsF_6

Principales variantes de las baterías Ion-Litio: Litio-Cobalto, Litio-Fosfato de hierro, Litio-Manganeso.

En la siguiente imagen, se podrá visualizar los distintos componentes comentados anteriormente durante el proceso de carga y descarga que posteriormente se explicará.

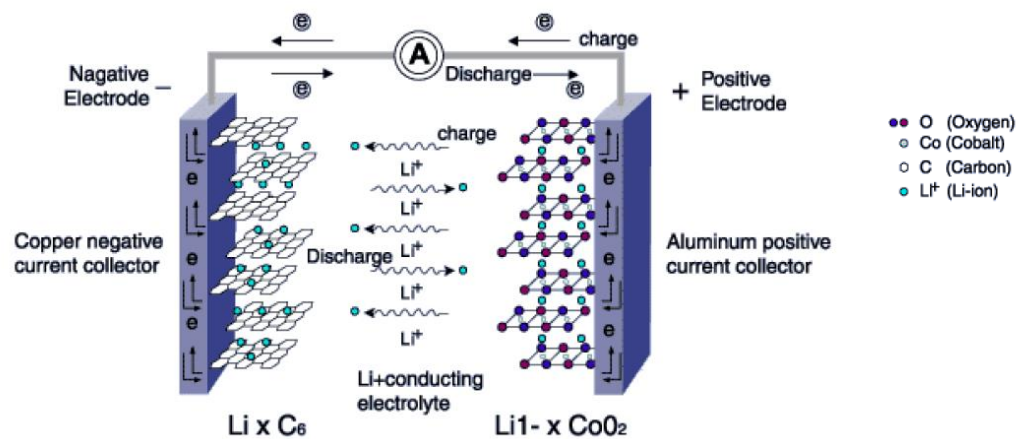
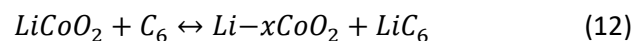


Figura 26. Funcionamiento de una batería de Ion-Litio. Fuente: Hernández, A. ETSI.[32]

En la figura 26, podemos apreciar como el cátodo de litio libera electrones al medio ionizado convirtiéndose en iones. A su vez, el ánodo de carbono capta dichos electrones combinándolos con su capa más externa del componente. Durante su descarga, el proceso es exactamente el inverso; el ánodo de carbono libera electrones al medio y el cátodo de litio los capta por medio del medio iónico.[32]

Las reacciones químicas que se dan en dichos procesos son las siguientes:



Teniendo en cuenta la composición química que presentan los elementos que constituyen las baterías de litio, estas se subdividen en 6 tipos distintos. A pesar de que su composición química varía, comparten las características que las hacen diferenciarse con las demás baterías; mayor duración, tamaño reducido, a su vez menor peso y la capacidad de trabajar a altas temperaturas. A continuación, se procede a definir de forma breve las principales características que dicha mezcla química proporciona a las baterías. [34]

- **Baterías de litio y fosfato de hierro.** Este tipo de baterías, también conocidas como baterías de litio LFP, reciben su nombre debido a la composición química de sus electrodos; un cátodo compuesto por $LiFePO_4$ y un ánodo de grafito. Gracias a su mezcla química, dichas baterías resultan ser las más seguras del mercado actual, facilitando su uso a altas temperaturas. Con una capacidad (C) relativamente, se caracterizan por una autodescarga relativamente elevada proporcionando grandes potencias. En la actualidad, la embarcación panameña consta de baterías cuya composición química es de LFP, es decir, $LiFePO_4$.

- **Baterías de litio y óxido de magnesio.** Estas baterías, más comúnmente conocidas por las siglas de los elementos químicos de sus componentes, LMO, son baterías cuyos electrodos los constituyen un cátodo de LiMn_2O_4 , y un ánodo de grafito. Proporcionan a la batería resultante la capacidad de ofrecer grandes potencias en intervalos cortos de descarga. Debido a que no presentan un gran rendimiento, este tipo de baterías suele combinarse con níquel cobalto y manganeso (NMC), obteniendo de esta manera, mayores rendimientos, así como buenos resultados energéticos.
- **Baterías de litio y níquel, cobalto y manganeso.** Como se ha descrito en el caso anterior, estas baterías aportan un gran rendimiento y valores específicos de energía. No es extraño ver baterías cuya composición química es el resultado de la mezcla de este tipo de baterías con las descritas en la subdivisión anterior. En el presente trabajo, observaremos una propuesta de baterías que presentan una composición química de LMO/NMC, es el caso de las baterías de litio de alto rendimiento que ofrece el fabricante alemán Torqeedo, con su modelo Power 48-5000. Junto a las baterías de litio y óxido de magnesio, están presentando una gran crecida en el mercado náutico por su amplia ampliación industrial.
- **Baterías de litio y óxido de cobalto.** A diferencia de las baterías descritas anteriormente, las baterías con dicha composición química se caracterizan por presentar bajos niveles de potencias. Sin embargo, es capaz de almacenar grandes cantidades de energía. Su abreviación (LCO), proviene de las siglas de los componentes químicos LiCoO_2 . Debido a que hay otros tipos de baterías que presentan mayor seguridad – como en el caso de las baterías LMO/NMC – no suele optarse por el uso de estas baterías, así como las próximas a definir.
- **Baterías de litio, óxido de aluminio, cobalto y níquel.** También conocidas por las siglas de sus elementos químicos (NCA), son parecidas a las baterías con óxido de cobalto ya que presentan poca potencia con una gran capacidad de descarga. Las siglas NCA, provienen de la abreviación de LiNiCoAlO_2 .
- **Baterías de titanio de litio.** Son baterías que ofrecen al usuario gran seguridad, con una larga duración de la vida útil pudiendo trabajar en distintas temperaturas. Se caracterizan también por tener gran facilidad de carga, Sin embargo, su capacidad (C) es limitada y su coste de adquisición es elevado. Dichas baterías se denominan por las siglas LTO, abreviación de Li_2TiO_3 .

4.3.2 Baterías de Plomo-Ácido

Actualmente, debido a su extendida comercialización y su antigüedad de aplicación en el sector naval, las baterías más comúnmente utilizadas son las baterías cuya composición química se basan en Plomo-Ácido. Como consecuencia, presentan unos avances tecnológicos que, a las nuevas generaciones de baterías, las dotan de grandes capacidades de almacenaje (90%), un estado mínimo de carga (20%), utilizando un espacio reducido y a un precio de adquisición bajo. Estos factores hacen que sean muy útiles en embarcaciones con espacios limitados que buscan un producto con grandes prestaciones. Por contraposición, su tecnología exige altos requisitos de mantenimiento y su capacidad de descarga se ve limitada por el mínimo estado de carga admisible por cada batería.

Este tipo de baterías utilizan:

- Electrolito: Disolución de ácido sulfúrico (H_2SO_4) en agua (H_2O)
- Electrodo:
 - Ánodo: Plomo (Pb)
 - Cátodo: Óxido de plomo (PbO_2)

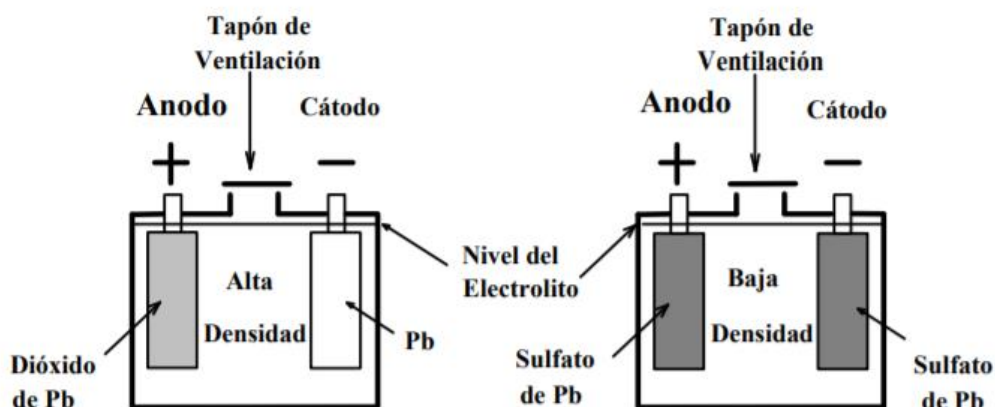


Figura 27. Funcionamiento de una batería de Plomo-Ácido. Batería cargada (izquierda), batería descargada (derecha) Fuente: <http://yachtmen.blogspot.com>[35]

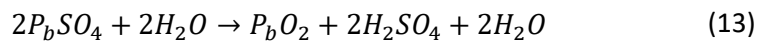
En la figura 27, se puede ver reflejado el proceso de carga y descarga de una batería de Plomo-Ácido. Su concentración de ácido varía entre un 70% y un 30% para plena carga y descarga. Durante el proceso de carga, el ánodo presenta una composición química de plomo prácticamente puro, en estado esponjoso. A su vez, el cátodo es de óxido de plomo y como electrolito, hay una disolución de ácido sulfúrico (H_2SO_4) en agua (H_2O). A medida que la batería recibe corriente eléctrica, la tensión aumenta hasta completar la carga total de la batería.

Durante la descarga, el ánodo reacciona con la corriente eléctrica suministrada por los bornes de la batería y, como consecuencia, se genera una concentración de sulfato de plomo, fruto de la combinación del óxido de plomo del cátodo y el ácido sulfúrico del electrolito. Cuando el oxígeno del PbO_2 y el hidrógeno liberado del H_2SO_4 , se unen formando agua (H_2O). Por otro lado, el Pb del ánodo se combina con el electrolito formando sulfato de plomo ($PbSO_4$).

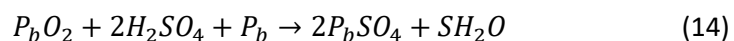
En consecuencia, se genera una disminución de densidad en el electrolito disminuyendo a su vez, la tensión hasta llegar al punto de descarga total de la batería.

A continuación, se muestra en las reacciones químicas de carga y descarga de una batería Plomo-Ácido, siendo estas reversibles.

- Reacción química total de carga:



- Reacción química total de descarga:



Una aplicación de este tipo de baterías, son las baterías solares. Dichas baterías son una variable dentro de la familia de los acumuladores de energía destinados a almacenar energía eléctrica procedente de paneles solares fotovoltaicos. Normalmente, se trata de baterías de plomo-ácido con electrolito líquido y de plomo-ácido de electrolito gelificado. Por lo tanto, forman parte de las baterías descritas anteriormente, en las que su constitución se basa en un ánodo de plomo esponjoso, un cátodo de óxido de plomo y un electrolito de ácido sulfúrico en agua. Dentro de la familia de baterías solares encontramos los siguientes tipos:

- **Baterías estacionarias.** Son conocidas por tener la capacidad de soportar profundas descargas y por permanecer largos periodos de tiempo con un estado de carga entre el 80% y el 100%
- **Baterías Monoblock.** Este tipo de batería suele utilizarse para el almacenamiento de energía procedente de instalaciones solares de tamaño pequeño sin conexión a ningún tipo de red.
- **Baterías de Gel.** Se caracterizan por tener incorporado en su constitución, un electrolito de gel altamente denso normalmente compuesto de dióxido de silicio. Es decir, su electrolito se fija mediante el uso de un gel. Este tipo de baterías no sufren derrames y su montura es muy generosa en cualquier banco de baterías.
- **Baterías AGM.** A diferencia de las baterías de gel, en las AGM (Absorbed Glass Mat) el electrolito se fija mediante una fibra de vidrio que lo mantiene como si fuera una esponja. De esta manera, consiguen un mayor rendimiento disminuyendo cualquier tipo de pérdidas. [36]

Suelen utilizarse para instalaciones donde se requieren altas corrientes en intervalos de tiempos muy cortos debido a su baja resistencia interna.

4.3.3 Baterías de Sodio-Sulfuro

Debido a la antigüedad de su invención, así como su comercialización, este tipo de batería junto a su constante evolución tecnológica, hacen que sea una de las más utilizadas en el sector náutico. Entre sus generosas prestaciones, destacan un estado mínimo de carga del 10% aportando un rendimiento de hasta el 89%, considerándose una batería de alta intensidad energética. Es por ese motivo que sus características tecnológicas hacen que sea posible utilizar este tipo de batería para el almacenamiento masivo de energía eléctrica. Por este motivo, este tipo de baterías suelen instalarse en grandes embarcaciones donde se necesiten grandes cantidades de energía. Por otro lado, presenta una ciclabilidad de 4.500 ciclos, clasificándose entre las más altas del mercado. Por contraposición, las baterías de sodio-sulfuro, necesitan unas temperaturas superiores a 300º para su funcionamiento óptimo. [32]

Desde un punto de vista sostenible, tienen la ventaja de ser 100% reciclables, característica que no suele verse en las distintas clases de acumuladores de energía.

Las baterías de Sodio-Sulfuro están compuestas de sales fundidas con electrodos cuyas composiciones se basan en sodio y azufre, ambos fundidos también. Por lo tanto, la composición química de sus componentes es:

- Cátodo (+): Azufre fundido.
- Ánodo (-): Sodio (Na) fundido.
- Electrolito: Separador cerámico.

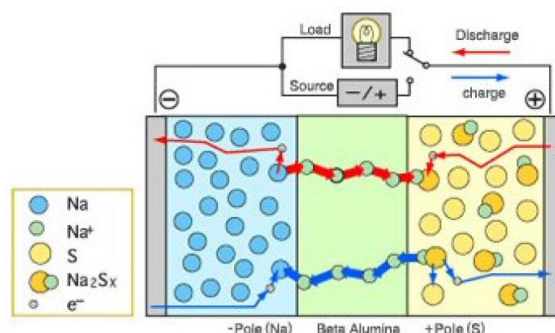
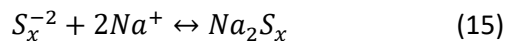


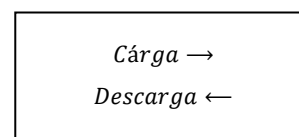
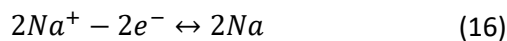
Figura 28. Funcionamiento de una batería de Sodio-Sulfuro. **Fuente:** Hernández, A. ETSI.[32]

En la figura 28, podemos apreciar el flujo de iones que se dan en las reacciones químicas durante la carga y la descarga de dichas baterías. En su descarga, el ánodo libera electrones de su capa más externa al medio ionizado, convirtiéndose en iones de sodio polarizados con carga positiva. A diferencia de las anteriores baterías explicadas en este capítulo, estas utilizan un separador cerámico de electrolito, por donde pasa el flujo de iones hasta llegar a ser captados por el cátodo compuesto de de azufre, creando polisulfuro. El proceso inverso pasa durante la carga de la batería.

- Reacciones químicas en el cátodo:



- Reacciones químicas en el ánodo:



4.4 Comparativa de las baterías

Para poder ver de una manera más visual las diferencias que hay entre las tres baterías estudiadas a lo largo del presente capítulo, a continuación, se muestra una tabla con las características principales correspondientes. El objetivo de esta tabla es poder llegar a la conclusión del tipo de batería más conveniente para la embarcación panameña.

| | | Baterías | | |
|------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | | Íon-Litio | Plomo-Ácido | Sodio-Sulfuro |
| Parámetros | Densidad de energía | 10,8 – 14,40 MJ/m ² | 60 – 180 MJ/m ² | 540 MJ/m ² |
| | Rango de energía | 36 × 10 ³ MJ | 144 × 10 ³ MJ | 172,8 × 10 ³ MJ |
| | Rango de potencia | 0,1 - 10 MW | 0,1 - 10 MW | 0,1 - 10 MW |
| | Tiempo de carga y descarga | Horas - Minutos | Horas - Minutos | Horas - Minutos |
| | Ciclos de carga/descarga | 4500 ciclos | 2500 ciclos | 4000-5000 ciclos |
| | Rendimiento | 94% | 90% | 80% |
| | Mínimo estado de carga | 10% | 20% | 10% |
| | Coste de la instalación | 530 €/kWh | 360 €/kWh | 285 €/kWh |
| | Coste de mantenimiento | 3 €/kWh | 2 €/kWh | 3 €/kWh |

Tabla 6. Comparativa técnica entre baterías de Íon-Litio, Plomo-Ácido y Sodio-Sulfuro. **Fuente:** Hernández, A. ETSI.[32]

Cabe destacar que, pese a que las tres baterías funcionan en un rango de potencias bastante similares, el rango de energía medida en (MJ/m²), es bastante distinto. En este parámetro se puede observar que las baterías de Sodio-Sulfuro son las que más rango proporcionan por m², de alrededor de 504 MJ/m²

Para conocer la energía (W) almacenada en una batería se utiliza el kWxh. Con una corriente de A amperios suministrado a una carga L produce una caída de tensión de V voltios, disipando una potencia de P watts relacionados por la fórmula:

$$P = \frac{W}{t} = V \times C \quad (17)$$

Aislando la W, tenemos que:

$$W = P \times t = V \times I \times t = V \times C$$

$$[W] = [kW] \times [h]$$

En cuanto al rendimiento de la batería, destacan las constituidas de Ion-Litio. Con un mínimo de estado de carga del 10% y un rendimiento de hasta el 94%, hacen que actualmente sea de las mejores opciones para instalar en el sistema propulsivo de la embarcación.

Desde un punto de vista económico, podemos observar que el coste de mantenimiento, calculado en €/kWh, es bastante similar entre las tres baterías estudiadas. Sin embargo, el coste de la instalación varía entre ellas, siendo las baterías de Ion-Litio las más caras de instalar.

Se puede ver también que los ciclos de carga y descarga, varían entre los 2.500 ciclos que presentan las baterías de Plomo-Ácido, hasta 5.000 ciclos que pueden llegar a presentar las baterías de Sodio-Sulfuro.

Uno de los parámetros que se tienen más en cuenta es el relacionado con la contaminación y el impacto medioambiental que supone la fabricación de este sistema propulsivo eléctrico y solar. Entre estos tres tipos de baterías, las de Ion-Litio son las menos contaminantes ya que en su composición no existen elementos químicos tales como plomo, cadmio o mercurio.

4.6 Disposición de las baterías

Según las prestaciones que se desee tener en cuanto a tensión e intensidad, existen distintos tipos de disposición de las baterías, con tal de alcanzar las necesidades del usuario de la forma más óptima posible. En este subapartado se explicarán las distintas configuraciones existentes. [4]

Como que la capacidad de una batería cuantifica la cantidad de energía suministrada a un voltaje nominal específico (12 V, 48 V, 96 V, etc), según el instrumento a alimentar, las baterías deberán conectarse en serie, en paralelo o en una combinación de estas dos, la disposición en serie-paralelo.

Disposición en Serie

Cuando conectamos en serie dos baterías con las mismas características (misma tensión de salida y mismo amperaje), la tensión de salida se multiplica por el número de baterías conectadas, sin alterar la capacidad de cada una de ellas. El corriente, al igual que la capacidad, será el mismo. [4]

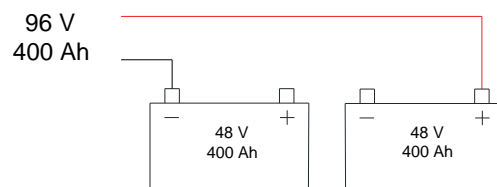


Figura 29. Disposición en serie de dos baterías. **Fuente:** Propia

Disposición en Paralelo

Cuando conectamos en paralelo dos o más baterías que presentan las mismas características, la capacidad de éstas se suma, debido a que el corriente total es el sumatorio del corriente de todas las baterías. La conexión en paralelo permite duplicar la capacidad de las baterías iguales conectadas, manteniendo la misma tensión de salida de cada batería. Este tipo de conexión se suele utilizar cuando se necesita almacenar grandes cantidades de carga. [4]

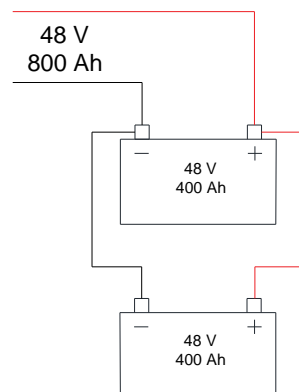


Figura 30. Disposición en paralelo de dos baterías. **Fuente:** Propia

Disposición Serie-Paralelo

Este tipo de configuración es una mezcla de la conexión de baterías en serie y la conexión de baterías en paralelo. Por consecuencia, obtiene los mismos beneficios tanto de una como de la otra. Por lo tanto, teniendo un banco de baterías cuyas baterías están conectadas en serie-paralelo, conseguiremos sumar tanto la tensión de salida como la capacidad. A diferencia de las anteriores disposiciones, en esta hay que prestarle especial atención a la sección del cable debido al alto voltaje e intensidad que circulan por el cableado. Una mala sección del cable puede producir daños tanto en el sistema eléctrico, como en el banco de baterías o el conjunto de instrumentos que se alimentan mediante esa fuente. Así mismo, es importante precisar en la longitud del cable, para evitar pérdidas de potencia. Contra más largo sea el cable, más resistencia habrá y, por consiguiente, más pérdidas de potencia. [4]

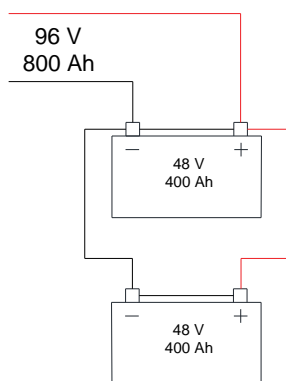


Figura 31. Disposición en serie-paralelo de dos baterías. **Fuente:** Propia

4.7 Comparativa

Para la poder llevar a cabo una propuesta de mejora en el sistema de banco de baterías destinado a la alimentación del motor eléctrico, primero se procede a realizar una comparativa entre dos baterías de dos fabricantes distintos. Por un lado, se analizará las baterías de alto rendimiento proporcionadas por la empresa alemana Torqeedo y, por otro lado, se analizarán las baterías de Ion-Litio de la marca holandesa Victron energy.

En la comparativa se tendrán en cuenta factores tales como la energía nominal que proporcionan cada una de ellas, así como su capacidad. El peso de la instalación es muy importante ya que, un incremento de peso significativo supondrá un esfuerzo extra al motor para poder alcanzar la velocidad deseada. Por consiguiente, se intentará obtener el mayor rendimiento intentando optimizar el peso en la mayor manera posible.

4.7.1 Batería Torqeedo Power 48-5000

La batería Torqeedo Power 48-5000 proporciona una capacidad de 100 Ah ofreciendo una energía nominal de 5.000 Wh, trabajando con una tensión nominal de 48 V. Como se ha comentado anteriormente, la marca alemana recomienda este tipo de baterías para alimentar motores con un consumo y unos valores de potencia tales como los que presenta el modelo Cruise 10.0 R.

Su composición es de LMO-NMC, siendo estas las siglas de Óxido de Magnesio y Litio (LMO), y Níquel, Cobalto y Magnesio (NMC). La combinación de estos elementos químicos proporciona a las baterías una gran potencia a corto plazo en el caso de LMO y un mayor rendimiento y comportamiento energético a diferencia de las baterías convencionales en el caso del uso de LMO. A diferencia de las baterías instaladas actualmente en la embarcación, (baterías con composición química de LiFePO_4) este tipo de batería presenta hasta un 70% de mayor densidad energética y una vida útil de la batería mucho mayor. A continuación, se muestra una tabla con los principales datos técnicos de la presente batería. [37]

| | |
|---------------------|---------------|
| Marca | Torqeedo [37] |
| Modelo | Power 48-5000 |
| Composición | LMO-NMC |
| Capacidad nominal | 104 Ah |
| Energía nominal | 5.000 Wh |
| Voltaje nominal | 48 V |
| Ciclos de vida útil | 3.000 ciclos |
| Peso unitario | 36,5 kg |
| Precio unitario | 4.999,99 € |

Tabla 7. Datos técnicos de la batería Torqeedo Power 48-5000. **Fuente:** Propia

Tal y como se aprecia en la tabla 7, las baterías Power 48-5000 presentan una capacidad nominal de 104 Ah y una energía nominal de 5.000 W. Para poder proporcionar la autonomía deseada en el presente trabajo, será necesario la instalación de un mínimo de 4 baterías conectadas en serie- paralelo. De esta manera, obtendremos una capacidad de 208 Ah trabajando a una tensión nominal de 96 V, la misma que la del motor propuesto en el capítulo anterior. Teniendo en cuenta el peso unitario, se aprecia que el banco de baterías tendrá un peso específico teniendo en cuenta el número de baterías:

- 2 baterías: 73 kg
- 4 baterías: 146 kg
- 6 baterías: 219 kg
- 8 baterías: 292 kg

Es importante remarcar que el número de baterías a instalar influirá principalmente en la autonomía de la embarcación. No obstante, en el presente trabajo se recomienda la instalación de un mínimo de 4 baterías, y no se recomienda el uso de 8, por lo que lo ideal sería la instalación de 4 a 6 baterías Torqeedo Power 48-5000.

Con cuatro baterías de estas características técnicas, le permite a la embarcación navegar por las islas del Archipiélago de las Perlas durante un tiempo aproximado de 5h, haciendo un balance de pesos del banco de baterías en comparación con el actualmente instalado, el resultado es positivo, ya que se consigue disminuir el peso 54 kg.

Con seis baterías conectadas en serie-paralelo, se consigue obtener autonomía más que suficiente para, no solo navegar entre las distintas islas del archipiélago, sino que le permite a la embarcación trayectos desde la costa de Panamá hasta la isla de Saboga, aproximadamente 2 viajes de ida y vuelta sin tener la necesidad de cargar las baterías. En cuanto al balance de pesos, a diferencia del peso que presenta el actual banco de baterías, saldría negativo ya que aumentaría el peso de este 19 kg, sin embargo, gracias a la disminución de peso obtenida con la nueva propuesta del motor eléctrico, el balance de pesos saldría positivo, por consecuencia, la instalación de un banco de 6 baterías Torqeedo Power 48-5000 seguiría siendo viable.

Con la instalación de 8 baterías, la autonomía aumentaría considerablemente y con ella el peso de la embarcación, así como el precio económico por lo que no se contempla como una solución viable para el caso de la embarcación panameña Sol de mi Vida.

A continuación, se muestra una tabla de las características que ofrecería un banco constituido por 4 baterías:

| Banco de baterías | Torqeedo |
|----------------------|----------------|
| Modelo | Power 48-5000 |
| Composición | LMO-NMC |
| Capacidad resultante | 208 Ah |
| Energía resultante | 20.000 Wh |
| Voltaje resultante | 96 V |
| Número de baterías | 4 Ud |
| Peso instalación | 146 kg |
| Conexión | Serie-paralelo |
| Precio | 19.999,94 € |

Tabla 8. Datos técnicos de un banco de baterías constituidas por 4 baterías Torqeedo. **Fuente:** Propia

4.7.2 Batería Victron energy Ion-Lithium HE 5.000Wh

El producto de la empresa Victron energy equivalente a las baterías de litio de la empresa Torqeedo, son las baterías de Ion-Litio HE 5.0 kW. Dichas baterías presentan una composición química de Ion-Litio NMC y ofrecen una capacidad nominal de 200 Ah trabajando a una tensión nominal de 24 V. Al igual que las baterías descritas anteriormente, proporcionan una energía nominal de 5 kW. Las presentes baterías permiten una conexión en serie (y 2 baterías), en paralelo (hasta 96 baterías) o en serie-paralelo.. El peso unitario es inferior al peso unitario de la batería Torqeedo, pasando de 36,5 kg a 28,6 kg. A continuación, se muestra una tabla con los principales datos técnicos de la presente batería.

| | |
|----------------------------|----------------------------|
| Marca | Victron energy [38] |
| Modelo | Ion-Lithium HE |
| Composición | Ion-Lithium NMC |
| Capacidad nominal | 200 Ah |
| Energía nominal | 5.000 Wh |
| Voltaje nominal | 24 V |
| Ciclos de vida útil | 3000 ciclos |
| Peso unitario | 28,6 kg |
| Precio | 4.499,00 € |

Tabla 9. Datos técnicos de la batería Victron energy. **Fuente:** Propia

Tal y como se ve reflejado en la Tabla 9, este tipo de batería tiene un peso unitario de 28,6 kg haciendo posible el uso de un número mayor de baterías sin suponer un cambio significativo en el peso total de la embarcación panameña. Al igual que las baterías de Torqeedo, su composición también es de Litio de alta capacidad (NMC) proporcionando una energía nominal de 5.000 W. Teniendo en cuenta el factor “peso”, a continuación, se muestra el peso que supondría el presente banco dependiendo del número de baterías instaladas.

- 2 baterías: 57,2 kg
- 4 baterías: 114,4 kg
- 6 baterías: 171,6 kg
- 8 baterías: 228,8 kg

En este caso, sería viable la opción de instalar un total de 6 baterías conectadas en serie paralelo. De esta manera, el banco tendría un peso inferior al peso que presenta el actual, pasando de 200 kg a 171,6 kg. Gracias a la conexión serie-paralelo, se obtiene una tensión resultante de 48 V y con una capacidad nominal de 600 Ah. A continuación, se muestra una tabla de las características que ofrecería un banco constituido por 6 baterías:

| Banco de baterías | Victron energy |
|----------------------|-----------------|
| Modelo | Ion-Lithium HE |
| Composición | Ion-Lithium NMC |
| Capacidad resultante | 600Ah |
| Energía resultante | 5.000 Wh |
| Voltaje resultante | 48 V |
| Número de baterías | 6 Ud |
| Peso instalación | 171,6 kg |
| Conexión | Serie-Paralelo |
| Precio | 26.994,00 € |

Tabla 10. Datos técnicos de un banco de baterías constituidas por 6 baterías Victron energy. **Fuente:** Propia

Económicamente hablando, hay una clara diferencia de precio unitario, siendo la batería de Victron energy más barata que la batería de Torqeedo, con un precio de 4.499,00 € y 4.999,00 € respectivamente. Este tipo de configuración solo es viable si el usuario decide mantener el motor Torqeedo Cruise 10.0 RL actualmente instalado, como motor de la embarcación, debido a que este tipo de baterías solo permite el conexionado en serie de hasta 2 baterías. Para llegar a una tensión nominal de 96 V – tensión nominal a la que trabaja el motor estadounidense Elco EP-30 – sería necesario de conectar más de 2 baterías Victron Energy en serie, caso que resulta inviable según el fabricante.

Para concluir, se presentan dos posibilidades:

1. Un banco de 4-6³ baterías Torqeedo Power 48-5000 conectadas en serie-paralelo con un motor Elco, modelo EP-30.
2. Un banco de 6 baterías Victron Energy conectadas en serie-paralelo con un motor Torqeedo, modelo Cruise 10.0 RL.

³ Dependiendo de las necesidades y presupuesto del propietario de la embarcación.

4.8 Cálculo de autonomía y capacidad

Para realizar el cálculo necesario para saber cuántas baterías serán necesarias para la obtención de un buen funcionamiento tanto del motor como de la embarcación, se definen que necesidades se desean cubrir.

- Autonomía. La presente embarcación se destina al transporte de personas entre las principales islas del archipiélago de las Perlas. Sin embargo, alguna vez necesita desplazarse hasta la costa de Panamá, situado a 48 km de distancia, es decir, 26 millas náuticas. Como consecuencia, la presente embarcación necesita tener la suficiente autonomía para realizar su trayecto más largo, descrito anteriormente.
- Necesidades de la embarcación. Para el cálculo de autonomía se utiliza el archivo Maxsurf de la embarcación⁴ estudiada en el presente trabajo.
- Necesidades del motor. Se tiene en cuenta que el motor utilizado para la navegación por las islas del Archipiélago de las Perlas tiene un consumo de 15,84 kW con una tensión nominal de 96 V.

Una vez definidas las necesidades a cubrir, se procede al cálculo de autonomía.

Primeramente, se procede a realizar el cálculo de intensidad a la que trabaja el motor. Este cálculo se realiza mediante la Ley de Ohm: [4]

$$P = V * I \quad (18)$$

Alisando el término I de la ecuación anterior:

$$I = \frac{P}{V} \text{ [A]}$$

Donde la potencia (P) corresponde a la necesaria para alcanzar los 6,5 nudos deseados⁵. Dicho valor es de 3,163 kW, por lo tanto:

$$I = \frac{3,163 \times 10^3 \text{ W}}{96 \text{ V}} = 32,94 \text{ A}$$

⁴ Dicho archivo ha sido Vida obtenido en un trabajo de final de grado en ingeniería en sistemas y tecnología naval anterior de la estudiante Júlia Reche.

⁵ Dicho dato se obtiene mediante el programa Maxsurf Resistance, donde introduciendo las formas del modelo de la embarcación a estudiar, se obtiene un gráfico potencia-velocidad (power-speed) mediante el método deseado. [42]

Una vez obtenida la velocidad a la cual trabaja el motor a la potencia indicada anteriormente, se procede a calcular el tiempo de descarga de una batería. Para ello, se aplica la ecuación de *Peukert*⁶, definida de la siguiente manera: [39]

$$\Delta Q = I^n * \Delta T \text{ [W]} \quad (19)$$

Donde:

- ΔQ es la capacidad de la batería
- I es la intensidad de descarga de una batería
- n es la constante de Peukert, siendo 1,036 para baterías de litio
- t es el tiempo que tarda una batería en descargarse

Aislando el término t :

$$t = \frac{\Delta Q}{I^n} \text{ [h]}$$

De esta manera obtenemos el tiempo que tarda la batería que se propone en el presente capítulo en descargarse.

$$t = \frac{104,167 \text{ Ah}}{32,94^{1,036}} = 2,78 \text{ h}$$

2,78 h es el tiempo que tarda una batería en descargarse aplicando al motor una potencia de 3,35 kW, necesaria para alcanzar una velocidad media de 6,5 nudos. Para cubrir la necesidad de alcanzar la autonomía definida al inicio del apartado, será necesario la instalación de al menos 4 baterías. En esta nueva situación, obtenemos una capacidad total de 208,334 Ah, y rehaciendo los cálculos obtenemos:

$$t = \frac{208,334 \text{ Ah}}{32,94^{1,036}} = 5,57 \text{ h}$$

Como se puede observar, el tiempo que tardará a descargarse un banco de 4 baterías a velocidad media de 6,5 nudos es de aproximadamente cinco horas y media.

Una vez conocidos los valores relacionados con la velocidad media a la que se desea navegar, y el tiempo que tardan en descargarse las baterías en las condiciones de trabajo explicadas anteriormente, se procede a calcular la autonomía en millas náuticas, mediante la siguiente ecuación:

⁶ Ley de Peukert. Ley que define la descarga no lineal de una batería. [39]

$$x(t) = v * \Delta t \text{ [mn]} \quad (20)$$

Substituyendo los valores por los obtenidos anteriormente, obtenemos que:

$$x(t) = 12,038 * 5,57 = 67,05 \text{ km} = 36,20 \text{ millas náuticas}$$

De esta manera, se llega a la conclusión que con 4 baterías Torqeedo Power 48-5000 conectadas en serie paralelo se obtiene una autonomía de 5,57 h de autonomía equivalente a 36,20 millas náuticas a una velocidad media de 6,5 nudos. Con la nueva propuesta de motor presentado en el presente trabajo, se puede llegar a una velocidad máxima de 8 nudos. Navegando a velocidad máxima se dispone de una autonomía de:

$$I = \frac{9,408 \times 10^3 \text{ W}}{96 \text{ V}} = 98 \text{ A}$$

Donde $9,408 \times 10^3 \text{ W}$ es la potencia necesaria para obtener una velocidad máxima de 8 nudos. Como se pudo observar, se requiere una intensidad de aproximadamente 100 A para poder cubrir dicha necesidad.

Aplicando la Ley de Peukert para esta situación utilizando 4 baterías conectadas en serie-paralelo, se obtienen los siguientes valores:

$$t = \frac{208,334 \text{ Ah}}{98^{1,036}} = 1,80 \text{ h}$$

De esta manera, se obtiene una autonomía de 1,80 h navegando a velocidad máxima de 8 nudos, permitiendo una autonomía en millas náuticas:

$$x(t) = v * \Delta t \text{ [mn]}$$

Substituyendo los valores por los obtenidos anteriormente, obtenemos que:

$$x(t) = 14,816 * 1,80 = 26,67 \text{ km} = 14,401 \text{ millas náuticas}$$

Conclusión: Con un banco de 4 baterías Torqeedo modelos Power 48-5000 conectadas en serie paralelo para poder alimentar al motor, se consigue superar la autonomía deseada, ya que la distancia entre el Archipiélago de las Perlas y Panamá es de aproximadamente 26 millas náuticas y la autonomía que el presente banco ofrece es de 36,20 millas náutica a velocidad media y 14,24 a velocidad máxima. Con dicho banco, tendrá la capacidad de navegar desde la costa panameña hasta la Isla de Saboga y navegar un periodo corto de tiempo por las distintas islas del archipiélago.

Para obtener una mayor autonomía, se propone la opción de instalar 6 baterías Torqeedo Power 48-5000 conectadas en serie paralelo, obteniendo los siguientes valores:

- Energía nominal: 30.000 W
- Tensión nominal: 96 V
- $Capacidad (C) = \frac{30000 W}{96 V} = 312,5 Ah$
- Incremento de peso del banco de baterías: 73 kg

Reajustando los cálculos realizados anteriormente con los nuevos valores obtenidos con un banco de 6 baterías, se obtiene:

- Autonomía en horas para una velocidad media de 6,5 nudos: 8,36 h
- Autonomía en millas náuticas: 54,37 millas náuticas
- Autonomía en millas náutica a velocidad máxima: 22,34 millas náuticas
- Autonomía para una velocidad máxima de 8 nudos: 2,67 h

Conclusión: Con un banco de 6 baterías Torqeedo modelo Power 48-5000 la embarcación sufriría un aumento de peso de 73 kg. Sin embargo, ofrecería una autonomía de 54,37 millas náuticas a velocidad media. Con estos nuevos valores, la embarcación Sol de mi Vida podría hacer 2 veces el trayecto Archipiélago - Costa de Panamá (ida y vuelta) sin la necesidad de cargar sus baterías de nuevo.

A continuación, se muestra una tabla resumen de los resultados obtenidos en el presente apartado.

| Banco de baterías | 4 baterías | | 6 baterías | |
|-----------------------------|------------|-------------|------------|-------------|
| Capacidad | 208,334 | | 312,501 | |
| Velocidades | Vel. media | Vel. máxima | Vel. media | Vel. máxima |
| Potencia motor (kW) | 3,163 | 9,408 | 3,163 | 9,408 |
| Intensidad de descarga (Ah) | 32,94 | 98 | 32,94 | 98 |
| Autonomía (h) | 5,57 | 1,78 | 8,36 | 2,68 |
| Autonomía (km) | 67,05 | 26,37 | 100,7 | 39,65 |
| Autonomía (millas náuticas) | 36,2 | 14,24 | 54,37 | 22,34 |

Tabla 11. Diferencia de autonomías con el uso de 4 y 6 baterías. **Fuente:** Propia

4.9 Propuesta del sistema de baterías

Para llevar a cabo la propuesta de mejora de sistema de baterías se han tenido en cuenta los siguientes aspectos.

- Los requisitos eléctricos de los distintos sistemas instalados a bordo de la embarcación, por ejemplo: los consumos eléctricos de la barca por servicio, donde intervienen elementos como la bomba de achique, el ancla, las luces de navegación y los distintos elementos de navegación (radar, radio, etc.)
- Los requisitos técnicos mínimos para obtener un buen funcionamiento del motor eléctrico. Dicho elemento cuenta con unas condiciones de trabajo de 98 V de tensión nominal y un consumo de 15,84 kW por hora.
- Se ha tenido en cuenta factores tales como el peso y el dimensionado de las baterías propuestas. Estos factores son muy importantes ya que el espacio en una embarcación de estas características es reducido y el peso es crucial para el cálculo de potencias y autonomía tanto de las baterías como del motor. En el presente proyecto se busca disminuir el peso total de la embarcación, teniendo en cuenta que la e-boat tiene un desplazamiento de 0,550 T y suele navegar con 10 personas. Según la normativa “UNE EN ISO 12217-1” el peso estimado por persona es de 75 kg. [40]
- Se ha llevado a cabo una comparativa con las baterías de Ion-Litio Power 48-5000 de la marca alemana Torqeedo, y las baterías de Ion-Litio de la marca holandesa Victron Energy donde se han comparado los principales parámetros a tener en cuenta para la determinación del producto final. Entre ellos el peso, las prestaciones técnicas y la autonomía de ambas baterías.

Se proponen dos tipos de baterías, una destinada al servicio de la embarcación denominada batería de servicio, y un pack compuesto de 6 baterías conectadas en serie-paralelo destinadas a la alimentación del motor eléctrico.

4.9.1 Batería de servicio

La batería propuesta para el servicio de los distintos sistemas eléctricos de la embarcación es presenta una composición química de litio, trabaja a tensión nominal de 12 V y una capacidad nominal de 90Ah. Dicha batería almacena la energía eléctrica que subministra el techo solar de la embarcación, por lo que irá conectada al regulador de carga MPPT que regula el suministro de electricidad proveniente de las placas solares.



Figura 32 Batería de servicio Super Cycle 12 V 90 Ah. **Fuente:** <http://www.victronenergy.com>[41]

Gracias al uso de esta batería, será posible el uso de todos los sistemas eléctricos instalados en la embarcación, entre ellos encontramos:

- Bomba de achique
- Iluminación LED
- Ancla de fondeo
- Puente de mando (Radar, radio)

4.9.2 Baterías de alimentación

Partiendo de la comparativa realizada en el apartado 4.8.1, en el presente trabajo se propone instalación de un banco de 4 o 6 baterías conectadas en serie-paralelo de la marca alemana Torqeedo. Por lo tanto, se opta por la opción un poco más cara pero que a su vez, proporciona una mayor autonomía a la embarcación.

Para asegurarse que la presente propuesta es viable teniendo en cuenta los pesos de la embarcación, la velocidad a la que se desea llegar y la autonomía que se espera tener, se ha analizado la gráfica “power-speed” mediante el *método Holtrop*⁷ a través del programa *Maxsurf Resistance* que, al introducir un modelo de las formas de la embarcación, se ha estudiado la viabilidad de la presente opción. En los anexos se disponen las figuras correspondientes a la utilización del programa *Maxsurf Resistance*. [42]

⁷ Según la Real Academia de la Ingeniería define el método de Holtrop como: “Método de cálculo de la potencia de propulsión de un buque que subdivide su resistencia total en componentes de diferente origen, la evaluación de cada componente se realiza aplicando análisis de regresión a una gran cantidad de datos experimentales.”



Figura 33. Batería de alto rendimiento Torqeedo modelo Power 48-5000 de litio. **Fuente:** <http://www.torqeedo.com>[37]

Opción (Torqeedo)

- | | |
|---|---------------------------|
| – 4 baterías conectadas en serie-paralelo | – Peso de 146 kg |
| – Capacidad de 208 Ah | – Conexión serie-paralelo |
| – Potencia de 20.000 W | – Precio 19.999,96 € |
| – Tensión nominal 96 V | |

Capítulo 5. Paneles fotovoltaicos

5.1 Introducción

En el presente capítulo se realizará un estudio sobre los paneles fotovoltaicos. En él, no solo entenderemos el concepto de panel o placa solar, sino que se estudiará su funcionamiento y principios básicos, así como los distintos tipos existentes hoy en día en el mercado. Después de haber realizado dicho análisis y de llegar a unas conclusiones, se procederá a la propuesta de mejora para la e-boat panameña “Sol de mi vida”.

Actualmente la embarcación consta de aproximadamente 17 m² de techo destinados a actuar como “techo solar”. En él, hay instaladas 8 placas solares fijas de la marca Vitrus II, que proporcionan una potencia de salida de 250 W cada una. Esta potencia, se regula mediante un controlador de carga MPPT, para después dirigirse hacia el banco de baterías solares instaladas a bordo. El uso de esa electricidad se destina a la alimentación de los instrumentos eléctricos tales como, instrumentos de navegación (radar), luces de proa, popa, ancla y bomba de achique.

5.2 Los paneles fotovoltaicos

Una placa solar fotovoltaica, es un dispositivo eléctrico dotado con la capacidad de convertir la radiación solar recibida sobre la superficie, en energía eléctrica de corriente continua (CC) sin la necesidad de una fuente de alimentación externa.

Su unidad más básica son diodos especiales, normalmente constituidos de silicio debido a su alto comportamiento electropositivo. Cuando reciben radiación procedente del sol, generan un gran número de pares que suministran corriente a la carga, en este caso, las baterías solares. Dichos diodos se agrupan formando las células solares que, a su vez, constituyen la placa solar. Las células solares se construyen con una capa positiva y una capa negativa, que juntas crean un campo eléctrico, como en el caso de una batería.

Cuando una célula recibe un haz de luz, capta su radiación produciendo un corriente negativo, subministrando energía a las baterías. A su vez, se produce una caída de tensión de aproximadamente 0,5 V por célula. Teniendo en cuenta que se dispone de entre 60 y 72 células en serie, obtenemos un voltaje sin carga de entre 30 y 36 V.

Normalmente, la eficiencia de conversión de energía solar a energía eléctrica es del 16%, teniendo en cuenta factores tales como la orientación de las placas, la radiación solar, la irradiación solar, etc. [4]

5.3 Principios básicos

Dicho instrumento se rige por el principio físico conocido como el efecto fotoeléctrico. Este fenómeno se produce al emitir cierta radiación electromagnética sobre una superficie metálica, a una frecuencia específica. Teniendo en cuenta que el metal es un material donde los electrones fluyen con cierta libertad, con un aporte energético lo suficientemente alto los electrones son capaces de superar la barrera aislante que separa las dos placas metálicas y abandonar el metal efecto fotovoltaico generando una corriente eléctrica sin la necesidad de una fuente de alimentación. Para que se produzca este fenómeno, es necesario aumentar la frecuencia de la luz hasta llegar al rango ultravioleta, en estas condiciones físicas, la superficie en cuestión absorbe la luz incidente y emiten electrones (e^-).

Para entender este fenómeno, es necesario remontarse a las explicaciones que dio el físico teórico Albert Einstein, que a través de las explicaciones que dio Max Planck (físico y matemático alemán), en las que decía que los fotones actúan como cuantos de energía (paquetes de energía que crecen con la frecuencia de la luz), afirmó que la luz de más alta frecuencia está formada por paquetes más energéticos. Estos paquetes son captados por los electrones, ya que los necesitan para poder superar la barrera aislante. Aumentar la velocidad de la luz sólo produce un aumento del número de paquetes, lo que hace que salten más electrones, pero con la misma energía. Éste es el principio detrás del funcionamiento de las células o placas solares. [17]

5.4 Parámetros principales

Una placa solar fotovoltaica es un tipo de dispositivo eléctrico que se caracteriza por su curva de corriente-tensión (I-V), donde se representa de forma gráfica las distintas configuraciones posibles de intensidad y voltaje que puede presentar dicha placa solar. Los valores mostrados en dicha gráfica varían en función de la irradiancia captada por la placa y las condiciones ambientales a las que se expone. En la imagen mostrada a continuación, se muestra las curvas de intensidad y potencia de un panel fotovoltaico convencional, en unas condiciones de SDC, es decir, con una irradiancia de 1.000 W/m^2 a temperatura ambiente de 25°C en un día soleado.

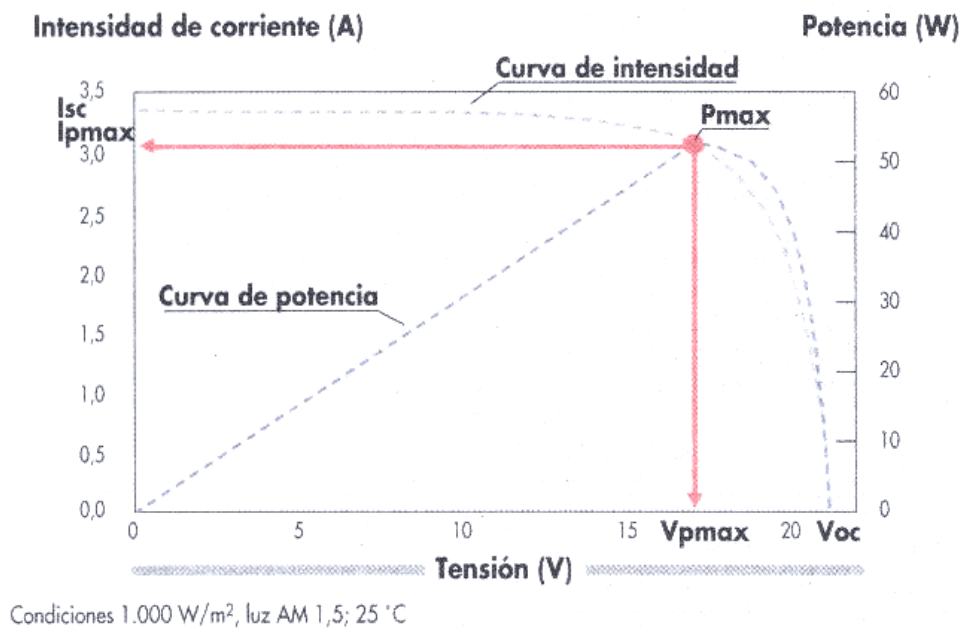


Figura 34. Curva característica (I-V) de una placa solar fotovoltaica. Fuente: <http://autosolar.es>[43]

Para poder entender dicha gráfica, es necesario definir los siguientes parámetros:

- **Intensidad de cortocircuito (I_{cc}).** También conocida como corriente de cortocircuito, es la máxima corriente (en condiciones SDC) que puede llegar circular por una placa solar siendo nulo su voltaje.
- **Tensión de circuito abierto (V_{oc}).** Es el voltaje máximo que puede llegar a alcanzar una placa solar (en condiciones SDC) con una intensidad nula ($I=0$)
- **Potencia máxima (P_m).** Es la máxima potencia que la placa solar proporcionara a la carga, en este caso, a las baterías solares (en condiciones SDC). La potencia (P) suministrada es el producto de la intensidad por el voltaje por el panel es: $P = I \times V$, que se ha representado también en la figura anterior.

A raíz de este parámetro, nacen otros valores como V_m , que hace referencia al valor nominal de la tensión. Otro de los valores que se obtienen a partir de la curva de potencia máxima, es el I_m . Este valor hace referencia a la intensidad que hay en el punto de la curva en el que se alcanza dicha potencia máxima. De esta manera, podemos definir la potencia máxima como el producto de V_m y I_m , quedando:

$$P_m = I_m \times V_m \quad (21)$$

- **Factor de forma (FF).** Expresado en %, este parámetro hace referencia a la relación existente entre la potencia máxima (P_{max}) y el producto de la intensidad de cortocircuito (I_{cc}) y la tensión de circuito abierto (V_{cc}). El factor de forma (FF) se interpreta teniendo en cuenta cuanto mayor sea el valor de FF, mayor será la calidad de la célula solar, por lo que un valor de FF pequeño indica que la célula solar en cuestión tiene pocas pérdidas de potencia.[44]

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \times V_{cc}} \quad (22)$$

- **Eficiencia.** Expresado en %, y es la relación entre la potencia eléctrica entregada por el panel y la potencia de la radiación que incide sobre él. Actualmente, una placa solar fotovoltaica presenta eficiencia estándar del 16%, y un panel de alta eficiencia sería a partir de 19-20%. Este factor varía en función del tipo de célula que presenta el panel, los materiales utilizados en su elaboración, etc.
- **STC.** Son las siglas de las palabras *Condiciones Estándar de Ensayo* y, como su nombre indica, son los valores a los que someten los módulos solares en situaciones aisladas de ensayo. Se encuentran en las fichas técnicas del producto y dichas condiciones son las siguientes:
 - Masa de aire: AM 1,5.
 - Irradiación: 1000 W/m².
 - Temperatura en celdas: 25 °C.

En el momento que se desea instalar un conjunto de módulos solares, ya sea en una embarcación, en una vivienda o terreno, es importante tener en cuenta factores tales como la orientación de las placas solares, las horas de sol pico o la geometría solar.

- **Irradiación.** Medido en Wh/m², es la energía solar que recibe una placa solar fotovoltaica en un periodo de tiempo determinado.
- **Irradiancia.** Es la densidad de potencia medida en W/m² recibida de forma instantánea sobre la superficie terrestre. Este valor se verá afectado por una serie de factores atmosféricos tales como la presencia de nubes, contaminación del aire o de la instalación, variación día-noche. También se verá afectada por factores como la orientación e inclinación de las placas solares respecto al sol, la composición de sus células solares (monocristalinas o policristalinas), etc.
- **Constante solar.** Con un valor de 1.367 W/m², es la irradiancia que emite el sol a la superficie terrestre. Sin embargo, este valor se verá afectado por factores como la contaminación atmosférica del lugar. De este modo, el valor de potencia captado por el módulo es inferior al emitido por el Sol.
- **Horas de Sol Pico.** Con un valor de 3,6 MJ/m², un H.S.P hace referencia al número de horas al día en que la placa solar fotovoltaica recibe una irradiancia máxima de 1.000 W/m² (STC) Este factor, es de suma importancia cuando se quiere calcular el rendimiento o la eficiencia energética que proporciona un sistema placas solares. Para hacer la conversión de Wh/m²a HPS, se utiliza el siguiente cálculo: [44]

$$1 \text{ HSP} = \frac{1.000 \times 1\text{h}}{\text{m}^2} \times \frac{3.600 \text{ s}}{1\text{h}} \times \frac{1\text{J}}{1\text{W}} = \frac{3,6\text{MJ}}{\text{m}^2} \quad (23)$$

Orientación e inclinación de las placas solares.

Es un factor que influye mucho en la producción energética de una instalación solar. Es importante tener este factor en cuenta cuando se dispone a realizar la distribución de las placas solares en la embarcación. Cuanto más perpendicular se encuentra el sol con respecto a la placa solar fotovoltaica, menor recorrido hará la radiación solar. Si se busca obtener el máximo rendimiento de una placa solar, se recomienda que la dirección de propagación de la radiación sea lo más perpendicular posible a la superficie incidente, ya que, de esta manera, se obtiene una radiación mayor que si colocamos dicha superficie en cualquier otra posición.

La posición del sol en un punto concreto viene dada por la altura y el azimut del sol. De este modo, a medida que la Tierra se desplaza con respecto a la posición del sol a lo largo del año, tanto la altura como el azimut variarán. Por consiguiente, el ángulo óptimo de inclinación de los módulos no será siempre el mismo.

Para poner solución a la inclinación óptima de los módulos solares, se propone un sistema mecánico en la base de la instalación que permita variar el ángulo de inclinación a según la hora del día o la época del año.

[44]

Actualmente, la embarcación panameña consta de un techo solar fijo, que no permite variar el ángulo de inclinación de los 8 módulos solares. Si tuviera dicho sistema mecánico, conseguiría un mayor rendimiento de su instalación solar como fuente de energía eléctrica.

5.5 Clasificación de las placas solares fotovoltaicas

Existen varios tipos de placas solares fotovoltaicas. Éstas se pueden clasificar según distintos factores, tales como la composición química de sus células, el proceso de fabricación y obtención de los materiales, su estado físico siendo rígidos o flexibles, etc. Sin embargo, en este subapartado se analizan las principales placas solares utilizadas en el sector náutico. Hay principalmente dos tipos; los paneles fotovoltaicos monocristalinos y los paneles fotovoltaicos policristalinos. Ambos se constituyen por diodos de silicio, variando sus propiedades, así como el proceso de obtención de sus células solares. [4]

5.5.1 Panel Monocristalino

Como bien indican su nombre, los paneles o placas monocristalinas están formadas por células monocristalinas. Reciben este nombre ya que dichas células están compuestas por un único cristal de silicio puro. Para dicha elaboración, se parten trozos de un mismo cristal de silicio, para posteriormente cortarlos en obleas. Una vez cortadas, dichas obleas pasan por una serie de procesos químicos tales como la metalización, dando lugar a la célula de silicio monocristalina.

Este tipo de célula se caracteriza por ser las más eficientes del mercado, alcanzando porcentajes de eficiencia de hasta el 22% (STC) en los casos de las marcas más avanzadas como SunPower. Al ser tan eficientes, cuentan con la ventaja de poder aprovechar mejor el espacio de instalación, factor importante a tener en cuenta para aquellas embarcaciones que disponen de poca superficie plana destinadas a instalar paneles solares. En la imagen mostrada a continuación, se podrá apreciar las características físicas que caracterizan a este tipo de placa solar, tales como un color oscuro y unas células que presentan un chaflán muy característico. [45]



Figura 35. Placa solar fotovoltaica con células solares monocristalinas. **Fuente:** <http://www.autosolar.es>[46]

5.5.2 Panel Policristalino

Los paneles solares policristalinos, están formados por células policristalinas de silicio. Reciben este nombre debido a que las obleas obtenidas durante su producción son fruto de dejar solidificar pequeños cristales de silicio de distinto origen. Una vez obtenidas dichas obleas, se tratan física y químicamente hasta la obtención de la célula solar. A diferencia de las células monocristalinas, éstas presentan un color azulado con una eficiencia menor, de alrededor del 14%. Esto es debido al origen del silicio, que, al no ser de un mismo cristal, disminuye su eficiencia considerablemente. Por otro lado, su coste de adquisición es bastante inferior a los paneles solares descritos anteriormente. A continuación, se muestra una imagen comparativa en la que se puede apreciar la diferencia entre los dos tipos descritos en el presente capítulo.[45]



Figura 36. Placa solar fotovoltaica con células solares policristalinas. Fuente: <https://www.wccsolar.net>[47]

5.5.3 Panel Amorfo

Este tipo de panel, también conocido como silicio amorfo o panel de capa fina, tiene la misma funcionalidad que los descritos anteriormente, pero debido a los avances tecnológicos de los paneles monocristalinos y policristalinos, la placa solar fotovoltaica de silicio amorfo ha ido quedando en desuso. A diferencia de los demás, su composición no consta de la unión de distintas células solares, sino que está constituida únicamente de una lámina cortada a medida. A su vez, dicha lámina la forman finas tiras de silicio. Dicha composición, presenta una serie de ventajas y desventajas que caracterizan a dicho panel. Por un lado, el empleo de materiales semiconductores más finos y versátiles, permiten al panel amorfo usarse tanto para placa solar rígida como para placa solar flexible, adaptándose en superficies irregulares.

Por otro lado, no se necesitan grandes cantidades de materiales e instalaciones por lo que el precio de adquisición disminuye considerablemente.

Por contraposición, debido a la mala calidad del silicio utilizado para la elaboración de dicho panel, presentan una eficiencia mucho menor que los paneles analizados anteriormente.

A parte de utilizarse silicio, su composición puede variar formando paneles fotovoltaicos con eficiencias distintas: Algunas de ellos están formados por: telurio de cadmio, arseniuro de galio, diseleniuro de cobre, etc.

Como se ha comentado anteriormente, existen variedades dentro de las características físicas que presentan cada panel solar, entre ellos destacan las placas solares fotovoltaica rígidas y flexibles. El 99% de las placas presentan una rigidez demasiado alta como para instalarse en superficie irregulares. Para ello, es necesario el uso de placas solares flexibles, que permiten ser dobladas hasta cierto punto sin sufrir microrroturas en sus células solares. A parte de tener dicha particularidad, su instalación no consta ni de marco que las delimite, ni de vidrio que las proteja. Estas van encapsuladas en polímeros que permiten dicha flexibilidad. [45]



Figura 37. Panel solar flexible. **Fuente:** <http://www.nousol.com>[48]

5.6 Distribución de las placas solares fotovoltaicas

Al igual que en el caso de las baterías, cuando se tiene una instalación solar es importante prestar atención a las necesidades que se desea cubrir y que tensión e intensidad se busca. En función de dichas necesidades, conviene un tipo de conexión entre placas u otro, pudiendo ser en serie, paralelo o mixto.

Las placas solares fotovoltaicas, se conectan entre si mediante ramas, donde en cada una de ellas puede haber varias placas. [49]

Distribución en serie

Este tipo de distribución se utiliza cuando se busca aumentar la tensión nominal de salida sin alterar la cantidad de intensidad generada. Como se ha comentado, los paneles solares se asocian por ramas o strings, siendo una instalación solar, el conjunto de todas estas ramas.

Con este tipo de distribución, la tensión de cada rama será el resultado de sumar la tensión nominal que genera cada uno de los paneles de esa rama. En el caso de la e-boat, el techo solar está compuesto por dos ramas de 4 paneles cada una. Generan una tensión de 30,1 V por lo que cada rama genera:

$$4 * 30,1 = 120,4 \text{ V por rama}$$

Para ello, se conectan los polos positivos de cada una de las placas con los polos negativos de las otras.

Distribución en paralelo

A diferencia de la distribución en serie, con este tipo de distribución lo que se busca es aumentar la corriente generada por cada rama de la instalación, manteniendo la misma tensión nominal. Es decir, la intensidad resultante de cada rama es la suma de las corrientes de cada placa solar. En el caso de la e-boat, cada panel subministra una intensidad de 8,31 A por lo que cada rama genera:

$$8,31 * 4 = 33,24 \text{ A por rama}$$

Para ello, se conecta el polo positivo de una placa con el polo positivo de otra placa y, por otro lado, el polo negativo con otro polo negativo.

Distribución mixta serie-paralelo

Como bien indica su nombre, este tipo de distribución es una mezcla entre la conexión en serie y la conexión en paralelo. Lo que se obtiene con este tipo de distribución es aumentar la tensión resultante de cada rama y a su vez, aumentar la intensidad. Es decir, tanto el voltaje total como la intensidad total de cada rama o string, será la suma de todas las tensiones e intensidades de los paneles asociados a esa rama. Por lo tanto, mientras que, en las anteriores configuraciones, cuando un valor aumentaba el otro se mantenía igual que el valor unitario de cada placa, en esta configuración se consigue aumentar ambos valores. Este tipo de conexión se suele aplicar en instalaciones que requieren unos valores tanto de tensión como de intensidad muy determinados. Según dichos valores, el propietario de la instalación podrá variar las conexiones (serie-paralelo) de las ramas para cubrir sus necesidades. En el caso de la e-boat, los valores obtenidos serían los siguientes:

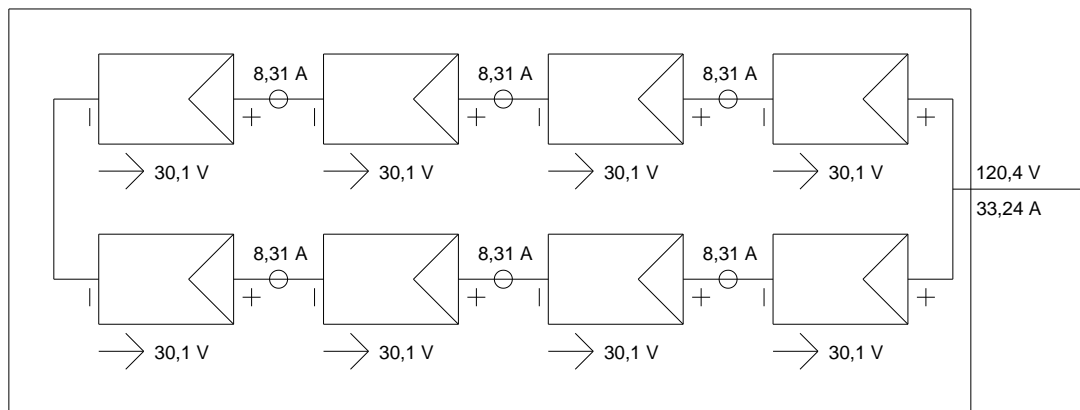


Figura 38. Conexión mixta de módulos solares. **Fuente:** Propia

5.7 Comparativa

Dejando de lado el panel amorfo, en este subapartado se puede apreciar una comparativa entre los dos tipos de paneles solares fotovoltaicos fundamentales: monocristalino vs policristalino.

En sus respectivos análisis, se ha podido ver que, pese a que ambos están constituidos por células solares de silicio, presentan características distintas que dependiendo a la finalidad que se le quieran dar, se optará por un tipo de panel u otro.

En temas de eficiencia, los paneles monocristalinos han resultado ser más eficientes que los paneles policristalinos, presentando una potencia de 170 W/m² y de 220 W/m² respectivamente. La razón principal de dicha diferencia de eficiencia se debe a su elemento principal; el silicio.

Mientras que, en una célula solar monocristalina, el silicio existente es puro al 99%, en una célula solar policristalina, el silicio existente es impuro, aparte de proceder de distintos cristales. En la imagen a continuación, se puede ver de forma más clara esta diferencia.



Figura 39. Comparativa entre un módulo solar policristalino (izquierda) y monocristalino (Derecha). **Fuente:** <http://www.jardin-solar.blogspot.com>[50]

En la imagen anterior, se aprecia a la izquierda un panel solar con células monocristalinas que, como bien se ha comentado en su anterior descripción, se caracterizan por un color negro y una célula lisa, debido a estar constituido por un único cristal de silicio. A la derecha de la imagen, se aprecia con un color azulado un panel solar policristalino, donde sus células presentan distinta tonalidad de color debido a la mezcla de cristales de silicio.

Cabe comentar, que una placa solar tiende a perder potencia a medida que sube la temperatura exterior, aun así, las placas fotovoltaicas monocristalinas, presentan un coeficiente de temperatura inferior que las policristalinas, es decir, en el caso de las primeras, la pérdida de potencia por grado aumentado es inferior a la pérdida de potencia que experimenta una célula policristalina.

En resumen, una célula monocristalina es más eficiente que una célula policristalina a altas temperaturas. Económicamente hablando, el proceso de obtención de las células policristalinas es menos costoso, factor que abarata el precio final del producto. Es decir, las células policristalinas suponen un coste de adquisición menor que las células monocristalinas.

En conclusión, si se usa este tipo de tecnología en una embarcación en la que se quiere obtener la máxima eficacia en un mínimo de espacio, se recomienda el uso de paneles solares constituidos por células monocristalinas. Por otro lado, si no se tiene en cuenta el coste de instalación, así como de la adquisición del producto, buscando calidad en las células y un alto rendimiento, optar por un panel policristalino es muy buena opción.

5.8 Principales fabricantes de placas solares fotovoltaicas

Existen varios fabricantes de placas solares fotovoltaicas, sin embargo, solo algunos pocos consiguen destacar en un mercado tan competitivo como el tecnológico. Para que un buen panel solar presente un buen rendimiento tanto al principio como a lo largo de su vida útil, los principales fabricantes se centran en una serie de factores que marcan la diferencia con los demás proveedores. Así pues, para obtener una placa solar de alta calidad, hay que tener en cuenta el siguiente criterio:

- Buena calidad de los materiales.
- El tipo de tecnología utilizada para la fabricación tanto del módulo como de la célula solar.
- El origen químico de la célula solar.
- La garantía que ofrece el fabricante.
- La eficiencia que presentan el producto.
- El precio. Relación calidad precio.

Actualmente, entidades de certificación reconocidas a nivel mundial como DNV-GL o TÜV Rheinland, realizan una serie de pruebas y análisis de calificación para placas fotovoltaicas. Algunos de las pruebas a las que se somete el producto para calificar la calidad y rendimiento del producto son:[51]

- Tests de Ciclos Térmicos.
- Tests de Calor Húmedo.
- Tests de Comportamiento Mecánico.
- Test PID (Degradación por Potencial Inducido).

Para realizar estos análisis, se rigen por la normativa creada por la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI9, también conocida como IEC (International Electrotechnical Commission) donde determinan las condiciones que debe soportar un panel solar para que se le califique como panel de buena-alta calidad. Sin embargo, DNV-GL duplica las condiciones a las que someten al producto, llegando a condiciones críticas para poder determinar cuáles son los mejores fabricantes, ya que no todos consiguen superarlos.

Dicho esto, después de la realización de las pruebas exigidas por las entidades de certificación, en el año 2019, los principales fabricantes con las mejores placas solares en cuanto a eficiencia y potencia son:

| Fabricante | Modelo | Eficiencia | Potencia Unitaria |
|------------|-------------------|------------|-------------------|
| SunPower | SPR-MAX3 | 0,227 | 370W-400W |
| LG | LG360Q1C-A5 | 0,208 | 360W |
| AUO | SunForte PM096B00 | 0,206 | 335W |
| SHARP | NQ-R256A | 0,198 | 256W |
| PANASONIC | VBHNxxxSJ25 | 0,197 | 330W |

Tabla 12. Comparativa de los principales fabricantes de paneles solares. **Fuente:** <https://www.sfe-solar.com>[51]

Debido a que dichos paneles solares fotovoltaicos están pensados para instalarlos en una embarcación, se debe tener en cuenta el espacio reducido para su instalación, así como la poca superficie plana que se dispone. De todos los paneles solares mencionados anteriormente, el fabricante Panasonic ofrece una gama de panel que se adapta a las necesidades de la embarcación panameña *Sol de mi vida*.

Con una eficiencia superior al módulo solar instalado actualmente (19,70% de eficiencia en el panel a proponer versus un 16% de eficiencia del módulo Virtus II), el fabricante Panasonic ofrece una gama de módulos solares constituidos por células monocristalinas con unas dimensiones que se adaptan al techo solar de la embarcación. Presentan una potencia unitaria de 330 W superando a los 250 W de potencia que ofrece el módulo actual. [51]

5.9 Cálculo de rendimiento y dimensionado

En este apartado se realizará el cálculo de rendimiento necesario de las placas solares fotovoltaicas para suministrar la electricidad necesaria a los distintos aparatos eléctricos instalados a bordo. Una vez finalizado este apartado, se logrará saber cuántas placas son necesarias para generar 1 kW de potencia o que hace que una placa solar fotovoltaica sea eficiente.

Actualmente la embarcación panameña Sol de mi vida consta con un techo solar en el cual hay instalados 8 paneles solares que proporcionan una potencia de 250 W en condiciones estándar de ensayo (SDC). Debido a su disposición, dichos paneles están conectados en serie, por lo que se consigue aumentar la tensión sumándolas entre ellas mientras que la intensidad se mantiene. Cada una de las placas suministran un voltaje máximo (V_{mp}) de 30,1 V, por lo que el techo solar suministra a la embarcación, un voltaje de $30,1 \times 8 = 248,8$ V, con una corriente de 8,31 A.

Una placa solar fotovoltaica, actúa con mayor eficiencia durante su HSP, para calcular la energía generada (por cada panel) a lo largo de esta franja del día, se procede a calcular: [49]

$$E_{panel} = I_{mp} * V_{mp} * HSP * 0,9 \quad (24)$$

Siendo I la intensidad proporcionada por el panel, V la tensión proporcionada por el panel, HSP que hace referencia a las horas de sol pico medidas en condiciones STC y 0,9 que es el coeficiente de rendimiento del panel. En la embarcación actual, dicha energía sería la siguiente:

$$E_{panel} = 8,31 \text{ A} * 30,1 \text{ V} * HSP(\text{Panamá}) * 0,9$$

Para calcular las horas de sol pico, se debe dividir el valor de la irradiación incidente entre el valor de la potencia de irradiancia en condiciones STC. Para su cálculo, se debe tener en cuenta la geolocalización del lugar donde se van a utilizar las placas solares fotovoltaicas y, según datos extraídos de las bases de datos de la NASA, el valor de HSP para un 15 de Julio en Panamá, es de $4,12 \frac{MJ}{m^2}$ obteniendo una energía por cada panel: [52]

$$E_{panel} = 8,31 \text{ A} * 30,1 \text{ V} * 4,12 * 0,9 = 924,40 \text{ Whd}$$

La ecuación anterior, se utiliza para el cálculo de energía de un panel solar. En nuestro caso, disponemos de 8 paneles solares, que crean una instalación de autoconsumo. Para el cálculo de la energía que proporciona dicha instalación, se utiliza la siguiente fórmula:[49]

$$E_{\text{Generador-fotovoltaico}} = I_{\text{Generador-fotovoltaico}} * V_{\text{Generador-fotovoltaico}} * \text{HSP} * 0,9 \quad (25)$$

Donde la intensidad se calcula como el producto de la corriente máxima de cada panel y el número de ramas en paralelo (en este caso 2). Por lo tanto, tenemos que la instalación presenta una $I_{\text{Generador-fotovoltaico}}$:

$$I_{\text{Generador-fotovoltaico}} = 8,31 * 2 = 16.62 \text{ A} \quad (26)$$

Por otro lado, la $V_{\text{Generador-fotovoltaico}}$, se calcula como el producto del voltaje máximo de cada panel y el número de paneles en serie (en este caso 4).

$$V_{\text{Generador-fotovoltaico}} = 30,1 * 4 = 120,4 \text{ V} \quad (27)$$

Por otro lado, tenemos un valor de HSP de 4,12. Por lo tanto, el techo solar proporciona una energía a la embarcación de:

$$E_{\text{Generador-fotovoltaico}} = 16,62 * 120,4 * 4,12 * 0,9 = 7,42 \text{ kWhd}$$

5.10 Propuesta de mejora

Actualmente, la embarcación panameña consta de 8 placas solares fotovoltaicas constituidas por células policristalinas, que ofrecen una potencia de 250 W. Para ello, consta de un total de 17 m² de superficie plana ubicada en el techo (techo solar) para la instalación de dichos paneles.

Debido a que se dispone de un espacio reducido para el uso de los módulos, en el presente trabajo se propone las siguientes mejoras:

- Cambio de panel solar policristalino a panel solar monocristalino. De esta manera obtendremos un mayor rendimiento pudiendo aprovechar mejor los 17 m² de superficie plana.
- Substitución de la marca actual ReneSolar por la marca Panasonic en paneles monocristalinos, modelo VBHNxxxSJ25. Con este cambio conseguimos reducir el peso de la instalación pasando de 18,5 kg/Ud que presentan las placas solares actuales, a un peso de 15 kg/Ud. En total, pasamos de una instalación de 148 kg a una instalación de 120 kg. Debido a que las dimensiones de las placas son menores, el espacio ocupado en el techo solar es menor, lo que permite reducir las dimensiones del techo solar y con él, el peso de la embarcación. [53]

El peso es uno de los factores más importantes a tener en cuenta durante los cálculos de potencia y autonomía tanto de las baterías de alimentación como del mismo motor eléctrico.

- Modificación de la estructura de soporte de los paneles solares que constituyen el techo solar. Con la implementación de los nuevos paneles, se dispone de más espacio libre. A su vez, se presenta la propuesta de instalar una estructura móvil que permita la inclinación óptima de los paneles solares fotovoltaicos, es decir, pasar de tener placas solares fijas en el techo, a la posibilidad de inclinarlas en función de la posición del sol. Como consecuencia, se obtiene más irradiancia solar emitida al panel eléctrico y, por lo tanto, más energía solar a convertir en energía eléctrica.

Capítulo 6. Conclusiones

Con el presente capítulo, finaliza la redacción del trabajo de final de grado en Ingeniería de Sistemas y Tecnología Naval. Dicho trabajo, lo constituyen un total de 6 capítulos que tienen como finalidad el estudio técnico, económico y medioambiental de un sistema de propulsión eléctrico y solar instalado en una embarcación de desplazamiento panameña de 6,7 metros de eslora, cuyo trabajo es el transporte de personas entre las islas situadas en el Archipiélago de las Perlas, en el golfo de Panamá.

A lo largo de los 6 capítulos, se ha tenido como objetivo principal el análisis y el estudio de los distintos elementos que constituyen dicho sistema de propulsión, con la finalidad de presentar un nuevo sistema en el que contenga mejoras relacionadas con el peso, potencia de propulsión, autonomía y coste económico. Para dar por finalizado el presente trabajo, se obtienen las siguientes conclusiones:

- Respecto al capítulo 2; gracias a los constantes e innovadores avances tecnológicos, disponemos de un amplio abanico de posibilidades para la generación de energía eléctrica y, de esta manera, poder cubrir gran parte su demanda a nivel mundial. Sin embargo, pese a que dicha energía resulte ser de las más sostenibles y libres de emisiones contaminantes en su uso comercial, al igual que cualquier proceso en el que interviene la actividad humana, la generación de energía (en este caso energía eléctrica) supone un impacto medioambiental negativo. Como hemos visto en dicho capítulo, la principal razón por la cual resulta ser tan contaminante es debido a la necesidad de quemar combustibles fósiles, principalmente petróleo y carbón, para la generación de energía. Conscientes de dicho impacto, y gracias a acontecimientos como la cumbre de París o los acuerdos de Kioto, celebrados con el fin de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de las principales potencias mundiales, hay varios proyectos puestos en marcha, donde la generación de energía eléctrica se realiza optimizando los sistemas de producción para minimizar y eliminar los contaminantes. La evolución tecnológica en términos de eficacia en la reducción de contaminantes permite utilizar combustibles con alto poder energético generando un reducido impacto ambiental.
- Analizando el impacto que supone la fabricación de los principales elementos de alimentación del sistema de propulsión estudiado en el presente trabajo (baterías y placas solares fotovoltaicas), se llega a la conclusión que las primeras generan un impacto negativo mucho mayor que en el caso de las placas. Principalmente porque las materias primas necesarias para su fabricación son mucho más difíciles de extraer y generan más emisiones de CO₂ que en el caso de los módulos solares, que solo necesitan pequeñas cantidades de silicio, fácilmente extraíbles de la naturaleza.

- Teniendo en cuenta el acelerado avance hacia un mundo sostenible, donde los avances tecnológicos tendrán como objetivo el uso de energías renovables y libres de emisiones, el sector náutico y naval se verá plenamente afectado, sobre todo a niveles propulsivos. De esta manera, pese a que actualmente la propulsión eléctrica y solar es una opción más cara que el uso de motores convencionales de combustión interna, en un futuro cercano, se prevé que la totalidad de embarcaciones sean propulsadas mediante motores eléctricos y a partir de energías renovables como la energía solar, dejando obsoleto el uso de combustibles para la navegación.
- En cuanto al estudio técnico llevado a cabo durante los capítulos 3, 4, y 5, se han alcanzado satisfactoriamente el principal objetivo de dicho estudio: ofrecer mejoras en cuanto al peso, potencia, autonomía y coste económico del sistema de propulsión instalado actualmente en la embarcación panameña Sol de mi vida. Dichas propuestas se resumen de la siguiente manera:
 - Un motor eléctrico más potente, menos pesado y con un coste económico más reducido.
 - Un banco de baterías que, pese a que supone un pequeño aumento de peso, ofrece mejores prestaciones tecnológicas gracias a la composición química que disponen sus baterías. Entre ellas, un mantenimiento menor y una autonomía mayor que la que ofrecía el actual banco de baterías.
 - Un techo solar constituido por otro tipo de placas solares fotovoltaicas, que ofrecen una disminución del peso, un mayor rendimiento energético, y una composición de sus células solares, basadas en cantidades más puras de silicio.
 - Dichas mejoras engloban un aumento de la velocidad media de la embarcación, así como su velocidad máxima.

A continuación, se dispone una serie de tablas resumen con un recopilatorio de los valores obtenidos en el presente trabajo. Entre ellas, aparece una tabla comparativa de precio y pesos entre la embarcación actual y la nueva propuesta, una tabla comparativa en cuanto a potencia y eficiencia que proporciona el nuevo motor y las nuevas placas en comparación con los modelos instalados hoy en día y, por último, una tabla resumen de la autonomía que proporciona el nuevo banco de baterías en comparación con el ya instalado en la e-boat panameña Sol de mi Vida.

| Elementos | TABLA RESUMEN PRECIO Y PESO | | | | | |
|-------------------|-----------------------------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | PESO | | | PRECIO | | |
| | Actual | Propuesta | % de mejora | Actual | Propuesta | % de mejora |
| Motor | 61,3 kg | 38,56 kg | 37,10% | 8.999,00 € | 6.397,02 € | 28,92% |
| Banco de baterías | 210 kg | 146 kg | 30,74% | 13.400,00 € | 19.999,99 € | -48% |
| Placas solares | 224 kg | 120 kg | 55,56% | 1.800,00 € | 2.000,00 € | -11,11% |
| TOTAL | 495,3 kg | 304,56 kg | +38,51% | 24.199,00 € | 28.397,01 € | -17,35% |

Tabla 13. Tabla resumen precio y peso de los elementos de un sistema de propulsión eléctrico-solar. **Fuente.** Propia

Tal y como se ve reflejado en la tabla 13, se consigue una mejora en cuanto al peso del motor de un 37,10% substituyendo el actual por el nuevo modelo propuesto en el presente trabajo. A su vez, el precio del motor estadounidense es inferior al motor alemán, obteniendo un ahorro económico del 28,92%. En el caso de las baterías, se han obtenido un resultado positivo en cuanto a los nuevos valores de peso del banco de baterías, consiguiendo un ahorro del 30,47% con respecto al actual. Sin embargo, la nueva propuesta resulta ser un 48% más cara que el banco instalado actualmente. Pese al aumento de coste, es importante considerar que las baterías que constituyen el nuevo banco no solo tienen una mejor composición química dotándolas de mejores prestaciones de trabajo, sino que presentan 1.500 ciclos más de vida útil.

A continuación, se explica qué significa lo explicado anteriormente:

Según las especificaciones de ambos fabricantes, las baterías alemanas le garantizan al cliente trabajar hasta 3.000 ciclos de carga a una capacidad del 80%. Por otro lado, el fabricante chino garantiza que sus baterías son capaces de trabajar a una capacidad del 80% durante 2.000 ciclos. [3]

CASO A (Banco de baterías actual)

Se dispone de un banco de 16 packs de baterías ofreciendo una potencia resultante de 17.000 Wh. Teniendo en cuenta dicha información, y retomando los cálculos realizados en el apartado 4.8 se obtiene que:

$$17.000 * 0,8 = 13.600 \text{ Wh}$$

teniendo en cuenta que el motor Torqeedo Cruise 10.0 RL, trabaja a una tensión nominal de 48 V, obtenemos la siguiente intensidad de descarga del banco de baterías:

$$I = \frac{13.600}{48} = 283,33 \text{ Ah}$$

A continuación, se aplica la Ley de Ohm:

$$P = V * I \quad (18)$$

Aislado I, obtenemos:

$$I_A = \frac{P_{motor}}{V_{motor}} = \frac{3,163 \times 10^3}{48} = 65,90 \text{ A}$$

Donde P_{Motor} hace referencia a la potencia requerida del motor para que la embarcación vaya a una velocidad media de 6,5 nudos. Una vez obtenida la intensidad requerida para alimentar el motor en dicha situación, se puede aplicar la fórmula de Peuckert:

$$\Delta Q = I^n * \Delta T \quad (19)$$

Aislado t, obtenemos:

$$t = \frac{283,33 Ah}{65,90^{1,036}} = 3,70 \text{ h}$$

Al multiplicarse el tiempo (t) por la velocidad a la que se desea ir (6,5 nudos) obtenemos la autonomía en millas náuticas, por lo que:

$$x(t) = 3,70 * 6,5 = 24,03 \text{ mn} \quad (20)$$

Ahora bien, 29,60 mn es la autonomía que se obtiene con 1 única descarga del banco de baterías trabajando al 80% de su capacidad. Con 2.000 ciclos trabajando al 80% de su capacidad, se obtiene la siguiente autonomía:

$$24,03 \text{ mn} * 2.000 \text{ ciclos} = \mathbf{48.072,76 \text{ mn}}$$

CASO B (Propuesta de mejora)

Se dispone de un banco de 4 baterías Torqeedo Power 48-5000 para alimentar un motor eléctrico que trabaja a una tensión nominal de 98 V. Cada una de las baterías presenta una capacidad nominal de 104.163 Ah y una potencia de 5.000 Wh. En total, se obtienen 20.000 Wh. Teniendo en cuenta dicha información, y retomando los cálculos realizados en el apartado 4.8 se obtiene que:

$$20.000 * 0,8 = 16.000 \text{ Wh}$$

teniendo en cuenta que el motor trabaja a una tensión nominal de 98 V, obtenemos la siguiente intensidad de descarga del banco de baterías:

$$I = \frac{16.000}{98} = 166,6 \text{ Ah}$$

A continuación, se aplica la Ley de Ohm:

$$P = V * I \quad (18)$$

Aislado I, obtenemos:

$$I_A = \frac{P_{motor}}{V_{motor}} = \frac{3,163 \times 10^3}{96} = 32,27 \text{ A}$$

Donde P_{Motor} hace referencia a la potencia requerida del motor para que la embarcación vaya a una velocidad media de 6,5 nudos. Una vez obtenida la intensidad requerida para alimentar el motor en dicha situación, se puede aplicar la fórmula de Puckert:

$$\Delta Q = I^n * \Delta T \quad (19)$$

Aislado t, obtenemos:

$$t = \frac{166,6 \text{ Ah}}{32,27^{1,036}} = 4,55 \text{ h}$$

Al multiplicarse el tiempo (t) por la velocidad a la que se desea ir (6,5 nudos) obtenemos la autonomía en millas náuticas, por lo que:

$$x(t) = 4,55 * 6,5 = 29,60 \text{ mn} \quad (20)$$

Ahora bien, 29,60 mn es la autonomía que se obtiene con 1 única descarga del banco de baterías trabajando al 80% de su capacidad. Con 3.000 ciclos trabajando al 80% de su capacidad, se obtiene la siguiente autonomía:

$$29,60 \text{ mn} * 3.000 \text{ ciclos} = \mathbf{88.821,28 \text{ mn}}$$

A partir de dicho valor, las baterías seguirán funcionando, pero a una capacidad inferior al 80% de su total.

De los cálculos realizados anteriormente se extraen la siguiente tabla:

| Banco de baterías | Actual | Propuesto | Diferencia | % |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------|
| Potenica (W) | 17.000 | 20.000 | 3.000 | 17,76% |
| Ciclos de vida | 2.000 ciclos | 3.000 ciclos | 1.000 ciclos | 33,33% |
| Autonomía (mn) | 48.072,76 | 88.821,28 | 40.748,52 | 84,76% |

Tabla 14. Comparativa de autonomías entre el banco de baterías actual y el propuesto. **Fuente:** Propia

De esta manera queda justificado que, aumentar un 48% el coste del banco de baterías a su vez supone un aumento de autonomía del 84,76%. Pese a que invertir en un banco de baterías Torqeedo supone un coste mayor a corto plazo, a largo plazo es una opción más económica, más eficiente y sostenible, ya que no es necesario el uso de tantas baterías para alcanzar dichos valores de autonomía.

| TABLA DE POTENCIAS Y EFICIENCIA | | | | |
|---------------------------------|------------|---------|-----------|-------------|
| Elemento | | Actual | Propuesta | % de mejora |
| MOTOR | Potencia | 5,6 kW | 9,504 kW | 41,08% |
| | Eficiencia | 56% | 60% | 4% |
| PLACAS | Potencia | 0,25 kW | 0,33 kW | 32% |
| | Eficiencia | 15% | 19,70% | 4,70% |

Tabla 15. Tabla resumen de las potencias y eficiencias obtenidas en el nuevo sistema de propulsión. **Fuente:** Propia

En la tabla 15, se reflejan los valores de potencia y eficiencia obtenidos con las nuevas propuestas tanto del motor eléctrico como de las placas solares. En ella, se aprecia un aumento de potencia del motor de un 41,08% respecto al motor Torqeedo actual y, en cuanto a las placas solares, los fabricantes Panasonic ofrecen un modelo de módulo solar con un 32% de mayor potencia, así como una mayor eficiencia de sus células solares.

Dicha potencia se ha realizado durante las horas de sol pico, pudiendo ampliarse al cálculo de la energía ofrecida durante todo el día y en situaciones climatológicas varias. En el presente trabajo se han realizado los cálculos para una embarcación que navega en un día soleado y despejado en el golfo de Panamá.

- El estudio de mercado realizado sobre la situación actual del motor eléctrico, baterías y placas solares dentro del sector náutico y naval ha sido lo suficientemente profundo como para poder realizar una comparativa entre los principales fabricantes de cada uno de ellos. Tras su realización, hay una evidencia concluyente y es que, debido a la poca madurez de dichos productos en el mercado encarece su coste de adquisición. A su vez, debido a que este tipo de propulsión sigue en fase de desarrollo y estudio, son pocas las empresas que se dedican a la fabricación y distribución de este tipo de propulsión.
- La conclusión mencionada anteriormente, junto a las conclusiones obtenidas en el capítulo relacionado con el impacto medioambiental que supone el uso de este tipo de tecnologías, confirma lo evidente: el motor eléctrico es el principal sustituto al convencional motor de combustión interna. Por otro lado, otras fuentes de energía menos contaminantes como la energía solar, la energía eólica, la energía a partir del gas y derivados están siendo cada vez más utilizadas para proporcionar soluciones sostenibles y libres de emisiones contaminantes al planeta.
- A nivel académico, mediante la realización del presente trabajo he podido poner en práctica gran parte de los estudios y conocimientos adquiridos a lo largo del grado y me ha dado la oportunidad de profundizar en las áreas de la ingeniería que más me apasionan, como el caso de la mecánica y la aplicación de las energías renovables como vía a una evolución sostenible.
Para llevar a cabo los cálculos de autonomía, ha sido necesario el uso de programas informáticos tales como Maxsurf (Modeler y Resistance), Autocad para la realización del nuevo sistema de propulsión propuesto, así como alguna de las figuras que aparecen a lo largo del documento y el programa Excel para la realización de balances energéticos y de pesos. Dichos programas se han utilizado en algunas de las asignaturas impartidas en el grado y ha sido gratificante poder realizar un uso práctico de las mismas.
- A nivel personal, concluyo el presente trabajo de una manera satisfactoria tras haber alcanzado la mayoría de los objetivos que tenía en mente antes de empezar
El hecho que aún se puedan realizar y aportar mejoras al proyecto, como por ejemplo el estudio económico, me motiva para retomar en un futuro próximo lo que finaliza hoy, para realizar el trabajo de final de máster. En él, espero poder tener la oportunidad y los conocimientos de diseño necesarios para realizar un estudio de viabilidad de la transformación de la embarcación sujeto de estudio, a una embarcación de doble casco o catamarán.

Bibliografía

- [1] M. E. Mellado, «Turismo: una nueva marea para el Archipiélago de Las Perlas. Pasados y presentes de unas poblaciones del Pacífico Oriental Tropical panameño», Universitat de Lleida, 2016.
- [2] «eboat-Panamá Barcos Lancha solar eléctrica, Electric boats». [En línea]. Disponible en: <http://www.eboat-panama.com/>. [Accedido: 08-oct-2019].
- [3] «Long Life Lithium Ion Battery 60Ah 3.2V». [En línea]. Disponible en: <https://cn.made-in-china.com/gongying/zgnewenergy-bosmqYVDEeUv.html>. [Accedido: 08-oct-2019].
- [4] L. Closas Torrente y P. Closas Gómez, *Electrònica naval*, Segona Edi. Barcelona, 2013.
- [5] Torqeedo, «Fueraborda-Cruise 10.0RL-Torqeedo». [En línea]. Disponible en: <https://www.torqeedo.com/es/productos/fuerabordas/cruise/cruise-10.0-r/M-1240-00.html>. [Accedido: 08-oct-2019].
- [6] «72-cell Poly Solar Panel 5Busbar». [En línea]. Disponible en: [http://www.renecola.com/product/Solar/Solar Panel/72-cell Poly Solar Panel 5Busbar/](http://www.renecola.com/product/Solar/Solar%20Panel/72-cell%20Poly%20Solar%20Panel%205Busbar/). [Accedido: 08-oct-2019].
- [7] «Marine-Victron Energy». [En línea]. Disponible en: <https://www.victronenergy.com/markets/marine>. [Accedido: 08-oct-2019].
- [8] «Solar Charge Controllers-Victron Energy». [En línea]. Disponible en: <https://www.victronenergy.com/solar-charge-controllers>. [Accedido: 09-oct-2019].
- [9] «Protocolo de Kioto - EcuRed». [En línea]. Disponible en: https://www.ecured.cu/Protocolo_de_Kioto. [Accedido: 08-oct-2019].
- [10] Naciones Unidas, «PROTOCOLO DE KYOTO DE LA CONVENCIÓN MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO», 1998.
- [11] CIIFEN, «CIIFEN - Efecto Invernadero». [En línea]. Disponible en: http://www.ciifen.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=99&Itemid=342&lang=es. [Accedido: 08-oct-2019].
- [12] Iberdrola, «EFECTOS AMBIENTALES DE LA PRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA:

- ACCIONES PARA SU CONTROL Y CORRECCIÓN», 2017.
- [13] Naciones Unidas, «GHG Data Interface - Global Maps», 2011. [En línea]. Disponible en: <https://maps.unfccc.int/di/map/>. [Accedido: 08-oct-2019].
- [14] M. Romare y L. Dahllöf, «The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries», Estocolmo, 2017.
- [15] M. Benavides Monroy y R. D. Gélvez González, «Análisis ambiental del ciclo de vida de las baterías Plomo-Ácido», Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2015.
- [16] M. Romare y L. Dahllöf, *The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries A Study with Focus on Current Technology and Batteries for light-duty vehicles*. 2017.
- [17] E. Carrillo Coll, «PROYECTO FIN DE CARRERA INSTALACION SOLAR FOTOVOLTAICA CONECTADA A RED», Universitat Politècnica de Catalunya, 2009.
- [18] «¿Qué impacto ambiental tiene la energía solar fotovoltaica? - Conéctate al Sol», 2015. [En línea]. Disponible en: <https://conectatealsol.com/news/que-impacto-ambiental-tiene-la-energia-solar-fotovoltaica/>. [Accedido: 08-oct-2019].
- [19] O. Boix, A. Joan, y R. Duran, *Màquines elèctriques*. Terrassa, Barcelona, 1998.
- [20] J. M. Mercadé i Capellades, S. Serra i Estrada, y M. Armengol i Solé, *Física 2*, Mc. Graw H. Madrid, 2009.
- [21] E. F. Contreras Villamizar y R. Sánchez Rodríguez, «DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRÁCTICAS EN MOTORES ELÉCTRICOS, COMO APOYO A LA ASIGNATURA DISEÑO DE MÁQUINAS II», Universidad Industrial de Santander, 2010.
- [22] «What are Magnetic field lines?», 2017. [En línea]. Disponible en: https://www.quora.com/What-are-Magnetic-field-lines?_escaped_fragment_=n%3D12&redirected_qid=20050759. [Accedido: 10-oct-2019].
- [23] «Instituto Newton C. Braga». [En línea]. Disponible en: <http://www.incb.com.mx/index.php/component/content/article?id=1819:curso-de-electronica-06>. [Accedido: 08-oct-2019].
- [24] Mc. Graw Hill, Ed., «Motores eléctricos», Madrid, 2009.
- [25] P. Casals Torrens y R. Bosch Tous, *Máquinas eléctricas*, Septiembre. Barcelona: Edicions UPC, 2005.
- [26] «Tipos de motores rotativos para proyectos de Arduino». [En línea]. Disponible en: <https://www.luisllamas.es/tipos-motores-rotativos-proyectos-arduino/>. [Accedido: 09-oct-2019].

- [27] «ePropulsion: Electric Outboards and Pod Drive for Boats». [En línea]. Disponible en: <https://www.epropulsion.com/>. [Accedido: 08-oct-2019].
- [28] «Electric outboards - aquawatt electric yachts, electric boats, electric boat motors, solarpowered vessels, solarpowered yachts - Green Marine Technologies». [En línea]. Disponible en: http://www.aquawatt.at/GB/elektro_aussenbordmotoren_14_GB.html. [Accedido: 08-oct-2019].
- [29] «EP-30 Electric Outboard - Elco Motor Yachts». [En línea]. Disponible en: <https://www.elcomotoryachts.com/product/ep-30-electric-outboard/>. [Accedido: 08-oct-2019].
- [30] P. Castells i Esqué, N. Riba i Soldevila, y F. Andreu i Mateu, *Química 2*, Segunda Ed. Madrid, 2013.
- [31] J. M. Bertran, «Métodos de estimación del estado de carga de baterías electroquímicas», Universitat Politècnica de Catalunya, 2017.
- [32] A. Hernández Romero, «Análisis económico de un sistema de almacenamiento para la disminución de desvíos de producción en un parque eólico», Universidad de Sevilla, 2016.
- [33] «AYUDA PARA INGENIEROS ELECTRICISTAS: PILAS Y BATERIAS (II) BATERIA Li-Ion». [En línea]. Disponible en: <http://colmenarezjl.blogspot.com/2015/04/pilas-y-baterias-ii-bateria-li-ion.html>. [Accedido: 08-oct-2019].
- [34] Vertiv, «EL SURGIMIENTO DE LAS BATERÍAS DE IONES DE LITIO EN LOS CENTROS DE DATOS», Columbus, Ohio, 2017.
- [35] «Yachtman: Bateria de Plomo-Acido». [En línea]. Disponible en: <http://yachtmen.blogspot.com/2007/05/bateria-de-plomo-acido.html>. [Accedido: 08-oct-2019].
- [36] «Selección de Batería Solar para fotovoltaica». [En línea]. Disponible en: <https://www.sfe-solar.com/baterias-solares/>. [Accedido: 09-oct-2019].
- [37] Torqeedo, «Batería de litio de alto rendimiento Power 48-5000-Torqeedo». [En línea]. Disponible en: <https://www.torqeedo.com/es/productos/baterías/power-48-5000/2104-00.html>. [Accedido: 08-oct-2019].
- [38] «Lithium battery 24V-Victron Energy». [En línea]. Disponible en: <https://www.victronenergy.com/batteries/lithium-battery-24v-180ah>. [Accedido: 08-oct-2019].
- [39] J. M. Bertran, «Métodos de estimación del estado de carga de baterías electroquímicas», Universitat Politècnica de Catalunya ETSEIB, UPC, Barcelona, 2017.

- [40] «Norma UNE-EN ISO 12217-1: Pequeñas embarcaciones. Evaluación de la estabilidad y la flotabilidad», 2017.
- [41] «Gel and AGM batteries-Victron Energy». [En línea]. Disponible en: <https://www.victronenergy.com/batteries/gel-and-agm-batteries>. [Accedido: 08-oct-2019].
- [42] J. Reche Tejero, «ESTUDIO Y PROPUESTA DE MODIFICACIÓN DE UNA EMBARCACIÓN CON MOTOR ELÉCTRICO Y ENERGÍA SOLAR», Universitat Politècnica de Catalunya, 2019.
- [43] Autosolar, «La curva de intensidad-voltaje y la de potencia-voltaje de un panel solar», 2018. [En línea]. Disponible en: <https://autosolar.es/blog/aspectos-tecnicos/la-curva-de-intensidad-voltaje-y-la-de-potencia-voltaje-de-un-panel-solar-el-papel-del-regulador-de-carga>. [Accedido: 09-oct-2019].
- [44] S. Europe, «Energía Fotovoltaica: Radiación, Geometría, Recorrido, Irradiancia y HSP», Santiago de Compostela (España).
- [45] S. Europe, «Usos y Tipos de Placas Solares Según Tecnología y Aplicaciones», 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.sfe-solar.com/paneles-solares/tipos/>. [Accedido: 09-oct-2019].
- [46] Autosolar, «Panel Solar Monocristalino». [En línea]. Disponible en: https://autosolar.es/panel-solar-12-voltios/panel-solar-180w-12v-monocristalino-era?gclid=Cj0KCQjwivbsBRDsARIsADyISJ_YY4fYuo-Oiyt7kSFyVh3fE08Zp1hYZ0P1iSPLMOvzd-rpOeT7rAUaAqViEALw_wcB. [Accedido: 09-oct-2019].
- [47] wccsolar, «Panel Solar Policristalino WccSolar», 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.wccsolar.net/product-page/panel-solar-310w-policristalino>. [Accedido: 09-oct-2019].
- [48] «Náutica-Nousol Solar Energy Systems». [En línea]. Disponible en: <https://www.nousol.com/our-works/nautica/>. [Accedido: 08-oct-2019].
- [49] S. Europe, «Cálculo Placas Solares, Conexiones y Producción Fotovoltaica». [En línea]. Disponible en: <https://www.sfe-solar.com/paneles-solares/calcular-paneles-solares-necesarios/>. [Accedido: 09-oct-2019].
- [50] «¿Monocristalino o policristalino?» [En línea]. Disponible en: <http://jardin-solar.blogspot.com/2015/03/monocristalino-o-policristalino.html>. [Accedido: 09-oct-2019].
- [51] S. Europe, «Los Paneles Solares más Eficientes de 2018-2019». [En línea]. Disponible en: <https://www.sfe-solar.com/paneles-solares/el-mejor-panel-solar-del-mundo/>. [Accedido: 09-oct-2019].
- [52] «POWER Data Access Viewer». [En línea]. Disponible en: <https://power.larc.nasa.gov/data-access->

viewer/. [Accedido: 08-oct-2019].

[53] Panasonic, «Photovoltaic Module HIT TM VBHNxxxSJ25 series», 2016.

A.2 Ficha técnica motor actual

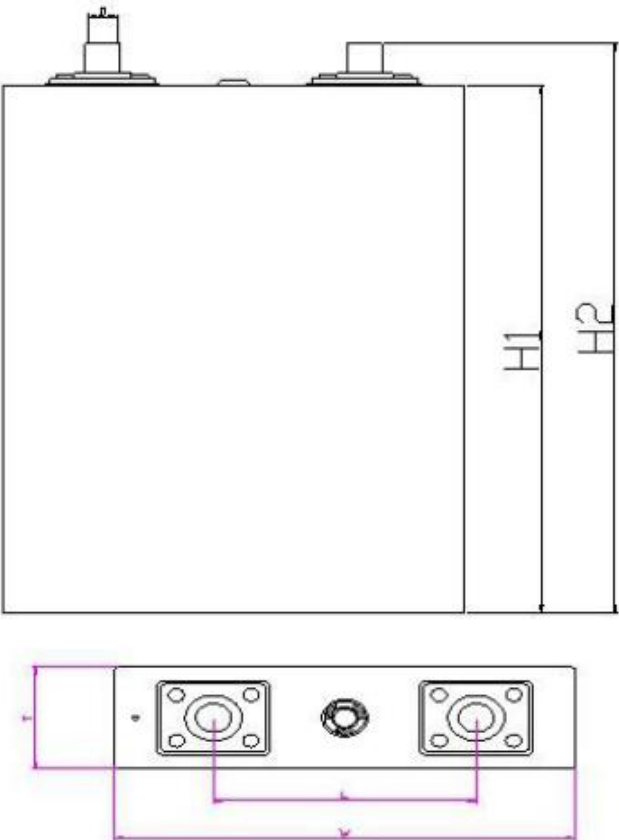
| | Cruise 10.0 R |
|--|---------------------------------|
| Consumo en vatios | 10.000 |
| Potencia de propulsión de vatios | 5.600 |
| Fueraborda equivalente de gasolina (potencia de propulsión) | 20 CV |
| Fueraborda equivalente de gasolina (empuje) | 25 CV |
| Eficiencia global máxima en % | 56 |
| Tracción a punto fijo en libras* | ≤ 405 |
| Batería integrada | - |
| Tensión nominal en voltios | 48 |
| Tensión final de carga en voltios | - |
| Peso total en kg | 59,8 (S) / 61,3 (L) / 62,5 (XL) |
| Peso motor sin batería en kg | - |
| Peso batería integrada en kg | - |
| Longitud de la caña en cm | 38,5 (S) / 51,2 (L) / 63,9 (XL) |
| Hélice estándar v = velocidad en km/h con p = potencia en vatios) | v22/p10k |
| Opciones alternativas de hélices | v32/p10k & v15/p10k |

A.3 Ficha técnica baterías actuales

| 1、产品类别/ Battery type | | | |
|---|---------------------|--------------|---|
| 本电池为铝壳磷酸铁锂系锂离子电池 | | | |
| This battery is prismatic Lifepo4 battery with Aluminum case | | | |
| 2、型号：本规格书适用于 ZG36130185P60Ah 型号电池。 | | | |
| Model: This specification is for ZG36130185P60Ah model battery. | | | |
| 3、产品规格参数/ Specification | | | |
| 项 目 / Item | | 性能 / Spec | 备注 / Remarks |
| 3.1 额定容量 / Rated Capacity | | 60Ah | 1/3C Discharge |
| 3.2 额定电压 / Rated voltage | | 3.2V | |
| 3.3 放电截止电压 / Cut off voltage | | 2.0V | |
| 3.4 标准充电方式 / Rated charge model | | 恒流恒压 / CC/CV | 0°C~40°C |
| 3.5 标准充电电流 / Rated charge current | | 20A (1/3C) | |
| 最大充电电流 / Max charge current | | 90A (1.5C) | Continuous |
| 3.6 标准充电电压 / Rated charge voltage | | 3.65V | -20°C~60°C |
| 3.7 标准放电电流 / Rated discharge current | | 20A (1/3C) | |
| 最大放电电流 / Max discharge current | | 180A (3C) | Continuous |
| 3.8 内阻 / Impedance | | ≤2mΩ | |
| 3.9 重量 / Weight | | ≤1685g | |
| 3.10 环境温度 Environment Temp | 充电 / Charge | 0°C~50°C | |
| | 放电 / Discharge | -20°C~60°C | |
| 3.11 贮存温度 Storage Temp | 1 个月以内 / In 1 Month | -20°C~60°C | 相对湿度 45%~ 75% / relative humidity 45%~ 75% |
| | 三个月以内 / In 3 Month | -20°C~45°C | |
| | 一年以内 / In 1 year | -5°C~30°C | |

4 尺寸和外观/ Dimension & Surface

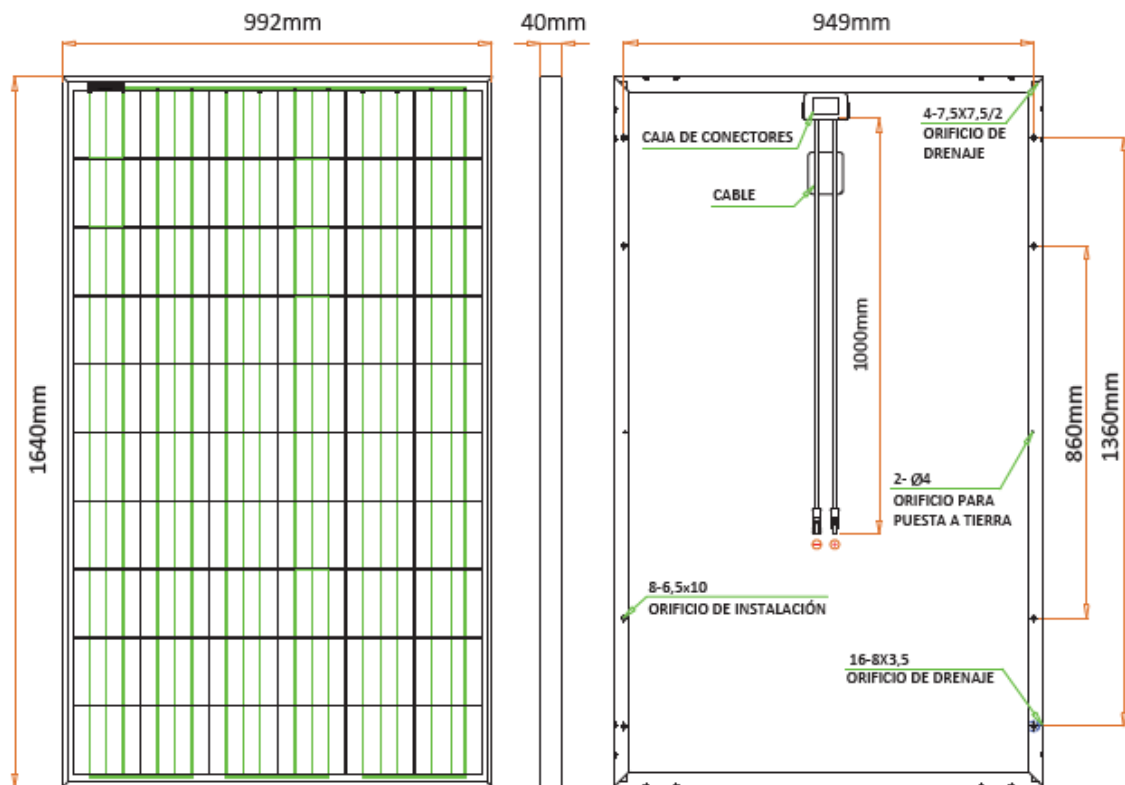
4.1 电池外型图及尺寸/ Drawing and dimension:



尺寸规格/ Dimension:

| | | | |
|----------------------------------|----------------|-------------------|----------------|
| H1 (不包括极柱) | 185.6±0.5 (mm) | H2 (包括极柱) | 200.0±0.5 (mm) |
| T (厚度/ Thickness) | 36.0±0.2 (mm) | W (宽度/ Width) | 130.0±0.2 (mm) |
| D (极柱中心距/ Pole central distance) | 74.0±0.2 (mm) | Φ (Pole diameter) | 10.0±0.1 (mm) |

A.4 Ficha Técnica placas solares fotovoltaicas actuales



Plano sólo para referencia

Características eléctricas STC

JC250M-24,

| | |
|---|---------|
| Potencia máxima (P _{máx}) | 250 W |
| Tolerancia del suministro eléctrico | 0 ~ +5W |
| Eficiencia del módulo | 15,4% |
| Máxima corriente de suministro (I _{mp}) | 8,31 A |
| Máximo voltaje suministro (V _{mp}) | 30,1 V |
| Corriente de cortocircuito (I _{sc}) | 8,83 A |
| Voltaje de circuito abierto (V _{oc}) | 37,4 V |

Valores en condiciones estándar de ensayo STC (masa de aire AM 1,5, irradiación 1000 W/m², temperat

Características eléctricas NOCT

JC250M-24,

| | |
|---|--------|
| Potencia máxima (P _{máx}) | 185 W |
| Máxima corriente de suministro (I _{mp}) | 6,57 A |
| Máximo voltaje suministro (V _{mp}) | 28,2 V |
| Corriente de cortocircuito (I _{sc}) | 7,12 A |
| Voltaje de circuito abierto (V _{oc}) | 35,0 V |

Valores a la temperatura normal de funcionamiento de las celdas, irradiancia de 800 W/m², espectro AI

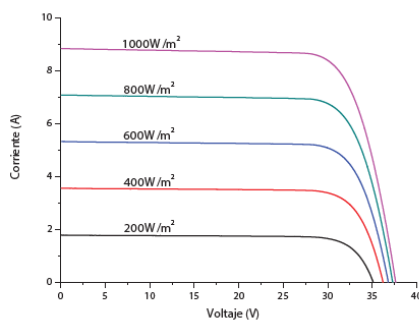
Características mecánicas

| | |
|---------------------------------------|---|
| Tipo de celda | Virtus®II (policristalino) 156 x 156 mm, 60 (6 x 10) piezas por serie |
| Cristal | Cristal templado de alta transmisión y bajo contenido de hierro |
| Gabinete | Aleación de aluminio anodizado |
| Caja de conectores | Certificado para IPC65/67, con diodos de derivación |
| Dimensión | *1640 x 992 x 40 mm |
| Cable de salida | 4 mm ² (UE)/12 AWG (EE.UU.), 1000 mm |
| Peso | 18,5 Kg |
| Ubicación del orificio de instalación | Consulte el plano anterior |

Información de embalaje

| Contenedor | 20' GP | 40' GP | 40' HQ |
|------------------------|--------|--------|--------|
| Tarimas por contenedor | 12 | 28 | 28 |
| Piezas por contenedor | 300 | 700 | 770 |

Curvas I-V



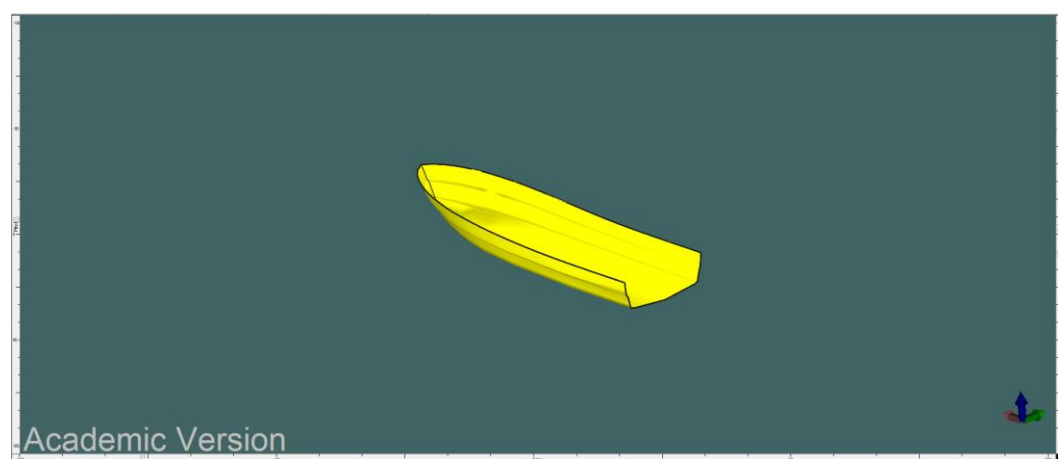
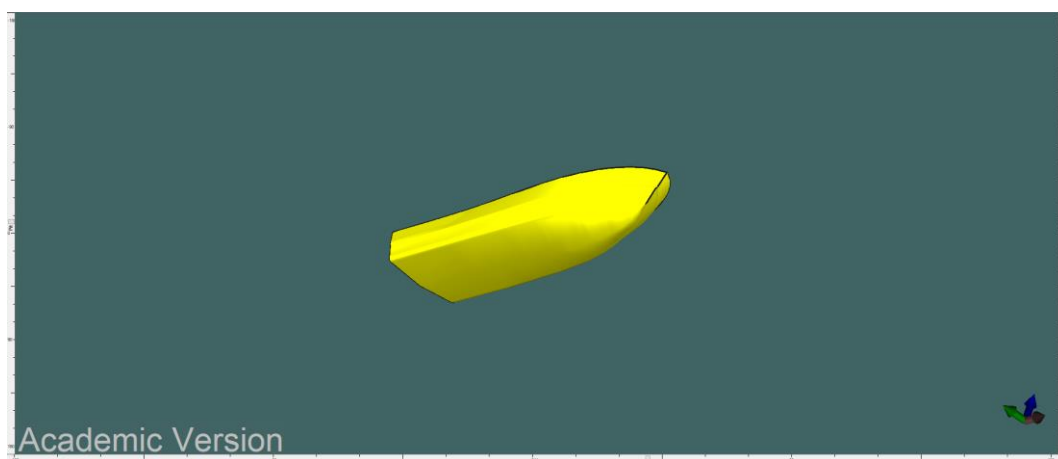
Eficiencias diversas de irradiación

| Irradiancia | 200W/m² | 400W/m² | 600W/m² | 800W/m² | 1000W/m² |
|-------------|---------|---------|---------|---------|----------|
| Eficiencia | 15,8% | 16,2% | 16,2% | 16,1% | 16,0% |

Anexo B. Características modelo usado en Maxsurf Modeler y Maxsurf Resistance.

B.1 Maxsurf Modeler

A continuación, se disponen recortes obtenidos a partir del modelo Maxsurf de la embarcación Sol de mi Vida facilitados en un trabajo final de grado en ingeniería en sistemas y tecnología naval anterior de la estudiante Júlia Reche. En él, he podido modificar los parámetros necesarios para obtener los nuevos valores técnicos necesarios para simular el dicho modelo con la finalidad de estudiar en Maxsurf Resistance.



| Hydrostatics at DWL | | | |
|---------------------|-----------------------------------|--------|-----------------------------|
| | Measurement | Value | Units |
| 1 | Displacement | 1,747 | t |
| 2 | Volume (displaced) | 1,705 | m ³ |
| 3 | Draft Amidships | 0,232 | m |
| 4 | Immersed depth | 0,359 | m |
| 5 | WL Length | 6,102 | m |
| 6 | Beam max extents on WL | 1,733 | m |
| 7 | Wetted Area | 10,088 | m ² |
| 8 | Max sect. area | 0,358 | m ² |
| 9 | Waterpl. Area | 8,804 | m ² |
| 10 | Prismatic coeff. (Cp) | 0,781 | |
| 11 | Block coeff. (Cb) | 0,449 | |
| 12 | Max Sect. area coeff. (Cm) | 0,693 | |
| 13 | Waterpl. area coeff. (Cwp) | 0,833 | |
| 14 | LCB length | 2,528 | from zero pt. (+ve fwd) m |
| 15 | LCF length | 2,608 | from zero pt. (+ve fwd) m |
| 16 | LCB % | 41,424 | from zero pt. (+ve fwd) % L |
| 17 | LCF % | 42,736 | from zero pt. (+ve fwd) % L |
| 18 | KB | 0,123 | m |
| 19 | KG fluid | 0,000 | m |
| 20 | BMT | 1,120 | m |
| 21 | BML | 12,490 | m |
| 22 | GMt corrected | 1,242 | m |
| 23 | GML | 12,613 | m |
| 24 | KMt | 1,242 | m |
| 25 | KML | 12,613 | m |
| 26 | Immersion (TPc) | 0,090 | tonne/cm |
| 27 | MTc | 0,035 | tonne.m |
| 28 | RM at 1deg = GMt.Disp.sin(1) | 0,038 | tonne.m |
| 29 | Length:Beam ratio | 3,521 | |
| 30 | Beam:Draft ratio | 4,826 | |
| 31 | Length:Vol ^{0.333} ratio | 5,108 | |
| 32 | Precision | Medium | 69 stations |

| | |
|--|--|
| Density (water) | <input type="text" value="1.025 tonne/m^3"/> |
| Std. densities | <input type="text" value="1.025 tonne/m^3 - Std. Metric sea water (1025.0 kg/m^3)"/> |
| VCG | <input type="text" value="0 m"/> |
| <input type="button" value="Recalculate"/> | |

Los valores mostrados son el resultado de substituir el actual sistema de propulsión por el nuevo sistema propuesto en el presente trabajo.

B.2 Maxsurf Resistance

A continuación, se muestran los recortes de los valores obtenidos en la gráfica Potencia-Velocidad (Power-Speed) realizada mediante el método de Holtrop.

B.2.1 Gráfica Potencia-Velocidad (P-V) para velocidad media

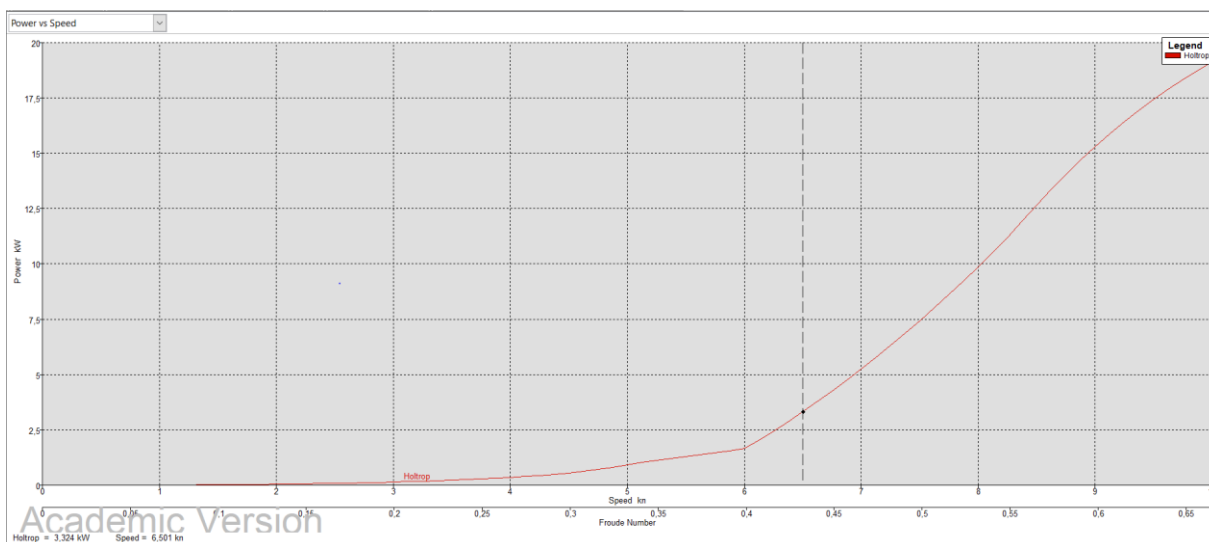


Figura 40. Grafica Power-Speed mediante el método de Holtrop para la embarcación panameña Sol de mi vida.

Fuente: Propia

B.2.2 Gráfica Potencia-Velocidad (P-V) para velocidad máxima

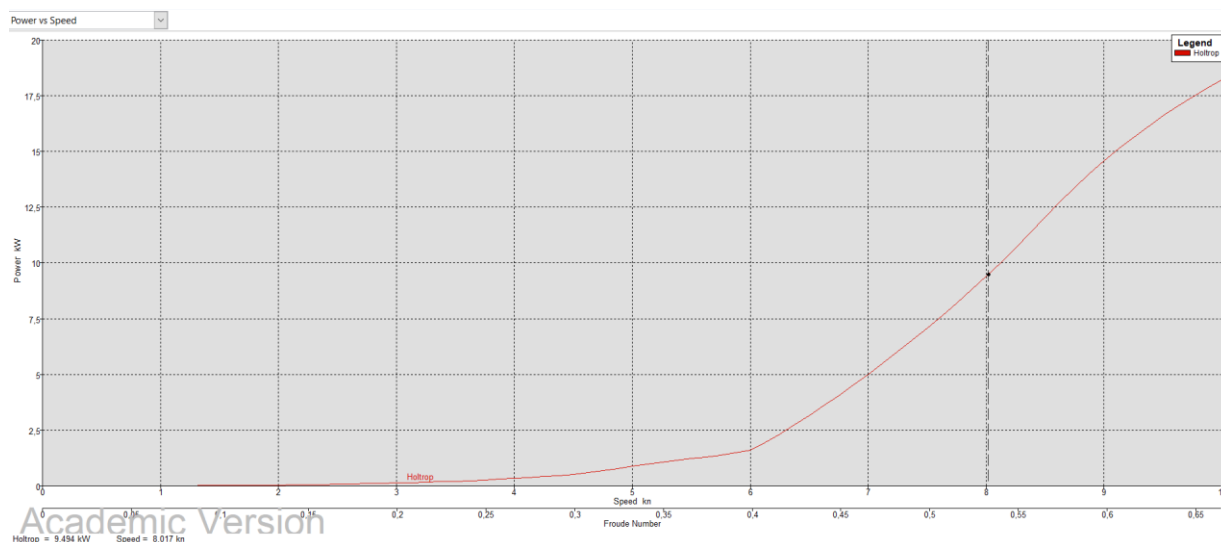


Figura 41. Grafica Power-Speed, método de Holtrop a máxima velocidad. Fuente: Propia

| Speed (kn) | Froude No. LWL | Froude No. Vol. | Holtrop Resist. (N) | Holtrop Power (kW) |
|------------|----------------|-----------------|---------------------|--------------------|
| 0 | 0 | 0 | -- | -- |
| 0,25 | 0,017 | 0,037 | 0,99 | 0 |
| 0,5 | 0,033 | 0,075 | 3,48 | 0,001 |
| 0,75 | 0,05 | 0,112 | 7,27 | 0,003 |
| 1 | 0,066 | 0,15 | 12,28 | 0,006 |
| 1,25 | 0,083 | 0,187 | 18,42 | 0,011 |
| 1,5 | 0,1 | 0,225 | 25,64 | 0,019 |
| 1,75 | 0,116 | 0,262 | 33,9 | 0,029 |
| 2 | 0,133 | 0,3 | 43,15 | 0,042 |
| 2,25 | 0,15 | 0,337 | 53,4 | 0,059 |
| 2,5 | 0,166 | 0,375 | 64,68 | 0,079 |
| 2,75 | 0,183 | 0,412 | 77,16 | 0,104 |
| 3 | 0,199 | 0,45 | 91,12 | 0,134 |
| 3,25 | 0,216 | 0,487 | 107,01 | 0,17 |
| 3,5 | 0,233 | 0,525 | 125,29 | 0,215 |
| 3,75 | 0,249 | 0,562 | 147,28 | 0,271 |
| 4 | 0,266 | 0,6 | 173,14 | 0,339 |
| 4,25 | 0,283 | 0,637 | 200,64 | 0,418 |
| 4,5 | 0,299 | 0,675 | 237,31 | 0,523 |
| 4,75 | 0,316 | 0,712 | 292,53 | 0,681 |
| 5 | 0,332 | 0,75 | 359,49 | 0,881 |
| 5,25 | 0,349 | 0,787 | 415,87 | 1,07 |
| 5,5 | 0,366 | 0,825 | 454,69 | 1,225 |
| 5,75 | 0,382 | 0,862 | 490,47 | 1,382 |
| 6 | 0,399 | 0,9 | 541,83 | 1,593 |
| 6,25 | 0,416 | 0,937 | 761,71 | 2,332 |
| 6,5 | 0,432 | 0,974 | 993,35 | 3,163 |
| 6,75 | 0,449 | 1,012 | 1225,8 | 4,054 |
| 7 | 0,465 | 1,049 | 1459,08 | 5,004 |
| 7,25 | 0,482 | 1,087 | 1693,16 | 6,014 |
| 7,5 | 0,499 | 1,124 | 1928,05 | 7,085 |
| 7,75 | 0,515 | 1,162 | 2163,75 | 8,216 |
| 8 | 0,532 | 1,199 | 2400,26 | 9,408 |
| 8,25 | 0,549 | 1,237 | 2637,56 | 10,661 |
| 8,5 | 0,565 | 1,274 | 2895,62 | 12,059 |
| 8,75 | 0,582 | 1,312 | 3119,97 | 13,375 |
| 9 | 0,598 | 1,349 | 3304,94 | 14,573 |
| 9,25 | 0,615 | 1,387 | 3452,47 | 15,647 |
| 9,5 | 0,632 | 1,424 | 3567,09 | 16,603 |
| 9,75 | 0,648 | 1,462 | 3654,48 | 17,457 |
| 10 | 0,665 | 1,499 | 3720,51 | 18,229 |

En la tabla anterior, se muestra los valores obtenidos en la gráfica *Power-Speed* analizando el comportamiento de la embarcación panameña con el nuevo sistema de propulsión. Como se puede observar, se ha marcado de color azul los nuevos valores de velocidades (media y máxima) y la potencia necesaria para navegar a tales velocidades, siendo 6,5 nudos la velocidad media y 8 nudos la velocidad máxima.

Anexo C. Balances de pesos y consumo

C.1 Balance de consumos

| Balance eléctrico Sol de mi Vida por servicio | | | | | | | |
|---|-----------------------|----------|--------------|--------------|----------------|-------------|-----------------|
| Sistema | Servicio | Unidades | Alimentación | Potencia (W) | Intensidad (A) | Durada (h)* | Consumo (A x h) |
| Equipo Navegación | Indicador Nivel Comb. | 1 | 12 V | 10 | 0,83 | 6 | 4,98 |
| | Luces de navegación | 4 | 12 V | 1,5 | 0,13 | 6 | 3,12 |
| | Comunicación VHF | 1 | 12 V | 6 | 0,15 | 6 | 0,9 |
| | GPS | 1 | 12 V | 45 | 3 | 6 | 18 |
| Interior | Luces LED | 6 | 12 V | 1,5 | 0,15 | 6 | 5,4 |
| Fondeo | Bomba de achique | 1 | 12 V | 36 | 3 | 6 | 18 |
| | Cadena de ancla | 1 | 12 V | 40 | 2 | 6 | 12 |
| Total | | 15 | 12 V | 140 | 9,26 | | 62,4 |

| Balance eléctrico Sol de mi Vida por día | | | | | | | |
|--|-----------------------|----------|--------------|--------------|----------------|-------------|-----------------|
| Sistema | Servicio | Unidades | Alimentación | Potencia (W) | Intensidad (A) | Durada (h)* | Consumo (A x h) |
| Equipo Navegación | Indicador Nivel Comb. | 1 | 12 V | 10 | 0,83 | 8 | 6,64 |
| | Luces de navegación | 3 | 12 V | 1,5 | 0,13 | 8 | 3,12 |
| | Comunicación VHF | 1 | 12 V | 6 | 0,15 | 8 | 1,2 |
| | GPS | 1 | 12 V | 45 | 3 | 8 | 24 |
| Interior | Luces LED | 6 | 12 V | 1,5 | 0,15 | 8 | 7,2 |
| Fondeo | Bomba de achique | 1 | 12 V | 36 | 3 | 8 | 24 |
| | Cadena de ancla | 1 | 12 V | 40 | 2 | 8 | 16 |
| Total x2 | | 14 | | 280 | 18,52 | | 82,16 |

C.2 Balance de peso

Situación actual

| Balance de pesos | Ud | Peso (kg) |
|-------------------|---------------|-----------|
| Embarcación | 1 | 550 |
| Motor | 1 | 61,3 |
| Banco de baterías | 6 | 200 |
| Techo solar | 8 | 200 |
| Personas | 10 | 750 |
| Pertrechos | 2 por persona | 50 |
| Total | | 1811,3 |

Propuesta de mejora

| Balance de pesos | Ud | Peso (kg) |
|-------------------|---------------|-----------|
| Embarcación | 1 | 550 |
| Motor | 1 | 38,56 |
| Banco de baterías | 6 | 182,5 |
| Techo solar | 8 | 172 |
| Personas | 10 | 750 |
| Pertrechos | 2 por persona | 50 |
| Total | | 1743,06 |

Anexo D. ESQUEMA REPRESENTATIVO DEL NUEVO SISTEMA DE PROPULSIÓN

D.1 Esquema sistema de propulsión

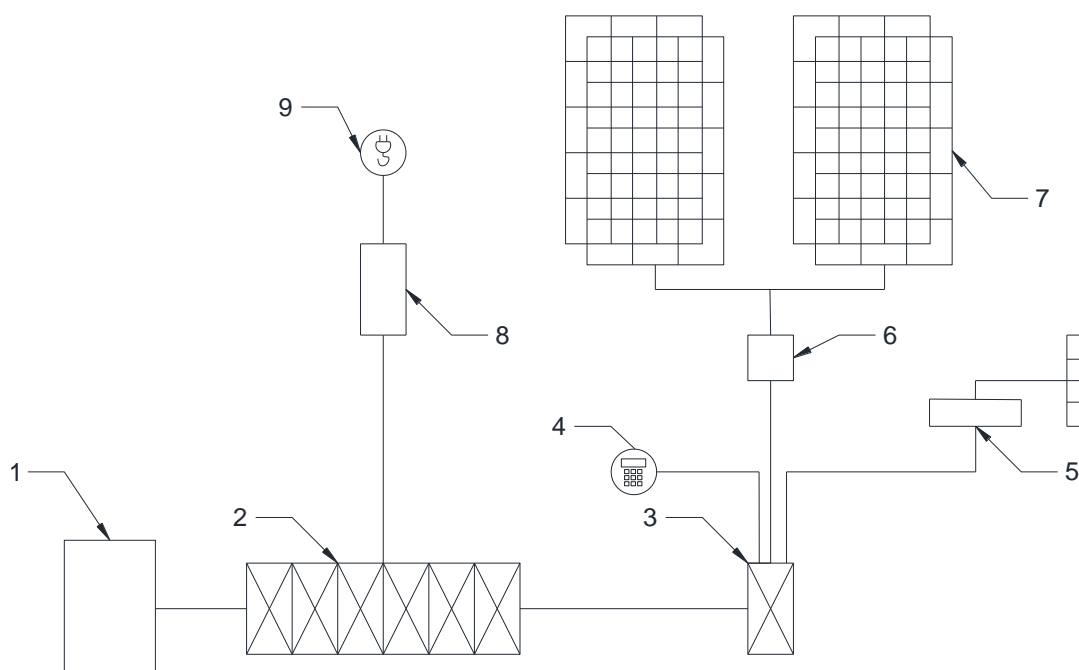


Figura 42. Esquema del nuevo sistema de propulsión eléctrico-solar para la embarcación Sol de mi vida. **Fuente:** Propia

1. Motor eléctrico Elco modelo EP-30.
2. Banco de 4 a 6 baterías Torqeedo Power 48-5000.
3. Batería de servicio Victron energy de litio 12 V.
4. Monitor de baterías Victron energy.
5. Protector de baterías.
6. Controlador de carga MPPT.
7. Techo solar constituido por 8 placas solares Panasonic modelo VBHNxxxSJ25.
8. Cargador.
9. Toma a tierra para la carga del banco de baterías.

Anexo E. Especificaciones técnicas del nuevo modelo de propulsión.

E.1 Ficha técnica motor Elco PE-3

E.2


ELECTRICOUTBOARD
EP-30

EP-30 ELECTRIC OUTBOARD FEATURES AND BENEFITS

- Reliable and durable construction with minimal maintenance required
- Available in tiller or top- and side-mount throttle control
- All motors available in long- or short shaft models
- Traditional design with standard aluminum casting so replacement parts are readily available
- Water-cooled system that prevents over-heating
- Multiple safety precautions including over-speed protection, overload protection, temperature protection, over-voltage and over-current protection
- Consistent power throughout the speed range
- Brushless PMAC motor that is over 90-percent efficient
- Cruise with peace of mind thanks to our "Get Home Safe" battery alert system
- Motors ranging from 5-HP to 60-HP
- Clean cruising without the hassles and hazards of gasoline
- Low cost of operation when compared to traditional gas motors



TILLER MODEL:



REMOTE MODEL: THROTTLE OPTIONS
Livorsi Side or Top Mount



| | |
|--|--|
| COMPARABLE GAS/PETROL RATING | 30 HP |
| INPUT POWER (WATTS) | 15840 watts |
| VOLTAGE | 96 vdc |
| MAXIMUM CURRENT | 165 amps DC |
| MOTOR | Brushless PMAC |
| STATIC THRUST | 300 lbs |
| COOLING SYSTEM | Water cooled |
| THROTTLE SYSTEM | Remote or tiller option |
| THROTTLE | Side mount or Top mount option, 16' length |
| THROTTLE CABLE EXTENSION <small>OPTIONAL</small> | 6' |
| LOWER UNIT GEAR RATIO | 2.08:1 (27/13) |
| GEAR OIL CAPACITY | 8.5 oz |
| TRIM AND/OR TILT | Manual |
| PROPELLER | 3 - 9 x 11 |
| WEIGHT | 90 lbs |
| SHORT SHAFT TRANSOM HEIGHT | 17.5" |
| SHORT SHAFT OVERALL <small>(HEIGHT, WIDTH, LENGTH)</small> | 43" x 11" x 18.5" |
| LONG SHAFT TRANSOM HEIGHT | 22.5" |
| LONG SHAFT OVERALL <small>(HEIGHT, WIDTH, LENGTH)</small> | 46" x 11" x 18.5" |
| MSRP | \$6,999 |

elcomotoryachts.com | 877-411-3526 (ELCO)





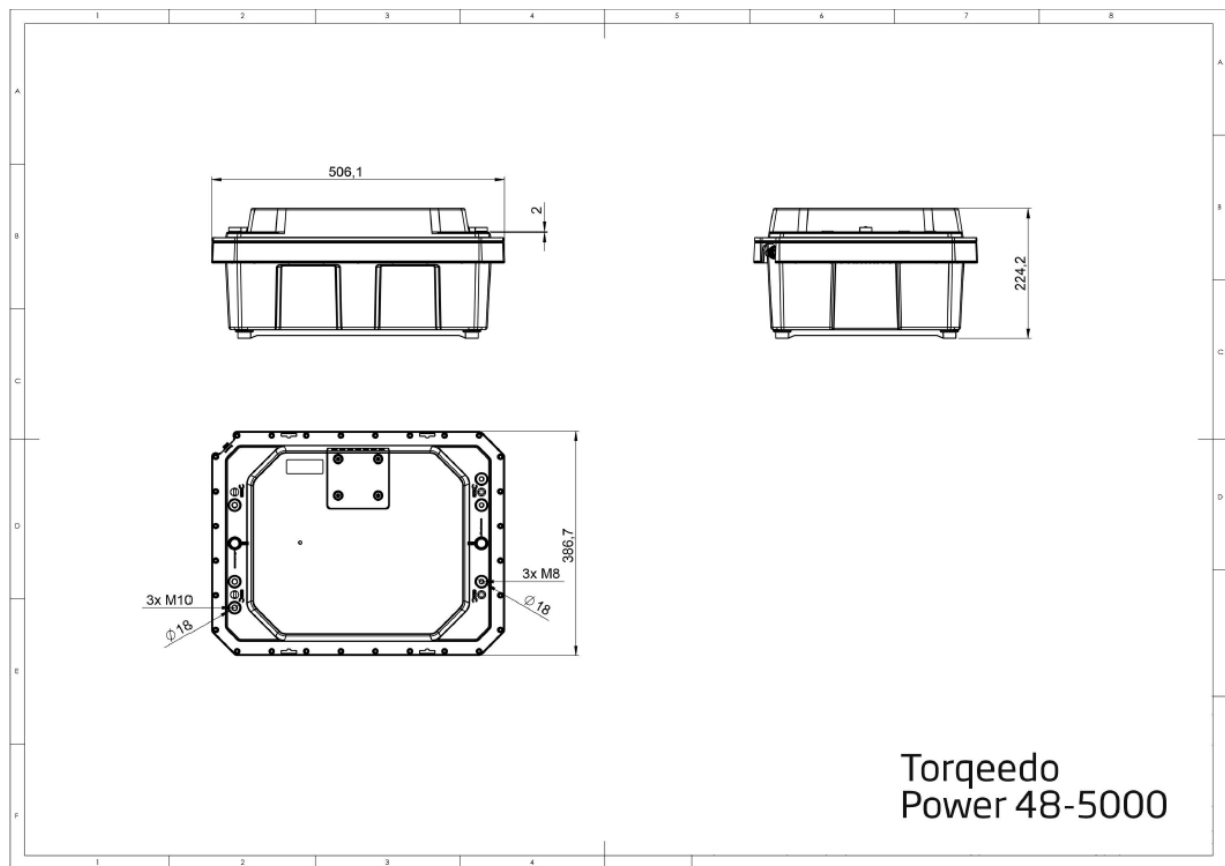

stay connected with Elco

Ficha técnica Batería Torqeedo Power 48-5000

Características técnicas

| | |
|--|--|
| | Power 48-5000 |
| Capacidad | 5.000 Wh |
| Tensión nominal | 44,4 V |
| Peso | 37,0 kg |
| Densidad energética (peso) | 135 Wh/kg |
| Régimen de descarga máxima | 200 A (8.880 W a la tensión nominal) |
| Dimensiones | 506 x 386 x 224 mm |
| Tipo de batería | Li NMC |
| Ciclos de vida útil de la batería | > 3.000 ciclos para una profundidad de descarga del 80% a 25 °C dan una pérdida de capacidad de carga de aprox. el 20% |
| Pérdida máxima de capacidad anual | <3% |
| Interconexión máxima | 2P |
| Relación valor/precio | 1 EUR/Wh |

E.3 Plano Batería Torqeedo Power 48-5000



E.4 Ficha técnica Placas solares fotovoltaicas Panasonic

SPECIFICATIONS

Standard Models – VBHNxxxSJ25

Electrical Specifications

| Model | | VBHN245SJ25 | VBHN240SJ25 |
|--|---|--------------------------|--------------------------|
| Cell Number in Series | | 72 | 72 |
| Rated Power, Watts (Pmax) | W | 245 | 240 |
| Maximum Power Voltage (Vpm) | V | 44.3 | 43.6 |
| Maximum Power Current (Ipm) | A | 5.54 | 5.51 |
| Open Circuit Voltage (Voc) | V | 53.0 | 52.4 |
| Short Circuit Current (Isc) | A | 5.86 | 5.85 |
| Cell Type | | Silicon hetero-junciton* | Silicon hetero-junciton* |
| Maximum System Voltage (Voc) | V | 1000 | 1000 |
| Maximum over-current protection rating | A | 15 | 15 |
| Factory Installed Bypass Diodes | | 3 | 3 |

Silicon hetero-junction* :Monocrystalline silicon/amorphous silicon hetero-junciton

Mechanical Specifications

| Model | | VBHN245SJ25 | VBHN240SJ25 |
|--------|----|-------------|-------------|
| Length | mm | 1580 | 1580 |
| Width | mm | 798 | 798 |
| Height | mm | 35 | 35 |
| Weight | kg | 15 | 15 |

E.5 Plano Placas solares fotovoltaicas Panasonic

